

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Konstrukční návrh pyrolytického kotle na spalování biomasy

Project of Design of Biomass Pyrolytic Boiler

Student:

Bc. David Onderka

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Onderka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Konstrukční návrh pyrolytického kotle na spalování biomasy**
Project of Design of Biomass Pyrolytic Boiler

Zásady pro vypracování:

Proveďte konstrukční návrh pyrolytického kotle určeného ke spalování biomasy pro výkon cca 30 kW.

Práce budou obsahovat:

1. Úvod do problematiky.
2. Rozbor aktuálního stavu na trhu kotlů včetně zdůvodnění volby pyrolytického kotle.
2. Návrh konstrukčního řešení kotle.
3. Pevnostní a další výpočty.
4. Popis a schéma systému pro provoz kotle.
5. Grafická část: rozsah min. 2 x A1.

Seznam doporučené odborné literatury:

Firemní literatura BOSCH

IBLER, Z. a kol. *Technický průvodce energetika I*. BEN Technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-7.
IBLER, Z. a kol. *Technický průvodce energetika II (Energetika v příkladech)*. BEN Technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-097-0.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr.Ing. Tadeáš Ochodek**

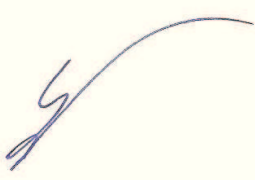
Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ONDERKA, D. Konstrukční návrh pyrolytického kotle na spalování biomasy: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 73 s. Vedoucí práce: Ochodek, T.

Podstatou této diplomové práce je navrhnout pyrolytický kotel na spalování biomasy. Celá práce je rozdělena do čtyř základních částí. V úvodních kapitolách jsou popsány termochemické přeměny biomasy a seznámení se základními částmi zplyňovacího (pyrolytického) kotle. Následující kapitoly popisují návrh kotle a zahrnují výpočtovou část. Další část se zabývá ekonomickým srovnáním několika kotlů pro vytápění rodinných domů. V poslední části je publikováno laboratorní měření vyrobeného prototypu.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ONDERKA, D. Project of Design of Biomass Pyrolytic Boiler: The Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2014, 73 s. Thesis head: Ochodek, T.

The merits of the thesis is to design pyrolytic boiler to biomass. The thesis is divided into four chapters. Thermochemical transformation of biomass and base parts gasification (pyrolytic) boiler are described at the first chapters. In the following chapters there describes design of boiler and calculations there are included. Another chapter deals economic comparison of several boilers to central heating of family housing. The last chapter is published laboratory measuring of produced sample.

Obsah diplomové práce

1.	Úvod.....	11
2.	Zplyňování biomasy.....	12
2.1	Procesy při zplyňování.....	13
2.2	Sušení.....	14
2.3	Pyrolýza.....	15
2.4	Oxidace	16
2.5	Redukce.....	17
2.6	Parametry generátorového plynu.....	18
2.7	Konstrukční řešení zplyňovacích generátorů	19
2.8	Zplyňovací generátor s pevným ložem.....	20
2.8.1	Protiproudý generátor	20
2.8.2	Souproudý generátor.....	21
2.8.3	Generátor s křížovým tokem.....	22
2.8.4	Porovnání generátorů s pevným ložem	23
3.	Zplyňovací kotel.....	24
3.1	Princip spodního spalování.....	25
3.2	Hlavní znaky a výhody zplyňovacího kotle.....	26
3.3	Palivo	26
3.3.1	Výhřevnost a obsah vody.....	28
3.3.2	Obsah popelovin.....	29
3.3.3	Obsah prchavé hořlaviny	29
3.4	Přikládací komora	30
3.5	Tryska.....	31
3.6	Spalovací komora	32
3.7	Výměník tepla.....	32
3.8	Spalovací vzduch.....	33
3.9	Spalovací ventilátor	33
3.10	Regulační přístroj	34

4. Technický návrh.....	35
4.1 Specifikace požadavků	35
4.2 Blokové schéma technického procesu.....	36
4.3 Schéma zapojení.....	37
4.4 Hrubý návrh.....	38
5. Konstrukční řešení	39
5.1 Kotlové těleso.....	39
5.2 Výměník kotle.....	41
6. Statika spalování	41
6.1 Složení generátorového plyn a výhřevnost.....	42
6.2 Množství teoretického suchého vzduchu.....	42
6.3 Množství skutečného suchého vzduchu.....	43
6.4 Množství skutečného vlhkého vzduchu	44
6.5 Množství teoretických spalín suchých	44
6.6 Množství skutečných spalín suchých.....	44
6.7 Množství skutečných spalín vlhkých.....	45
6.8 Přepočty množství na reálnou teplotu	45
6.9 Koncentrace složek ve spalínách.....	46
6.10 Ostwaldův spalovací trojúhelník	46
6.11 Teplota rosného bodu.....	48
7. Technické parametry.....	49
7.1 Množství generátorového plynu	49
7.2 Celkové množství vzduchu a spalín	50
7.3 Tepelný výkon.....	50
7.3.1 Spalovací komora	51
7.3.2 Výměník tepla.....	51
7.3.3 Tepelný výkon kotle.....	52
7.4 Komínový tah.....	53

8.	Účinnost kotle	54
8.1	<i>Ztráta komínová</i>	<i>54</i>
8.2	<i>Ztráta mechanickým nedopalem</i>	<i>54</i>
8.3	<i>Ztráta plynným nedopalem</i>	<i>54</i>
8.4	<i>Celková účinnost</i>	<i>55</i>
9.	Tepelná izolace	55
10.	Ekonomika	56
11.	Měřicí protokol	59
11.1	<i>Prototyp A</i>	<i>59</i>
11.2	<i>Prototyp B</i>	<i>60</i>
12.	Závěr	63
12.1	<i>Poděkování</i>	<i>64</i>
12.2	<i>Použitá literatura</i>	<i>64</i>
13.	Přílohy	65
13.1	<i>Výkres</i>	<i>65</i>
13.2	<i>Tabulky</i>	<i>65</i>

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotka
CH ₄	objemový podíl metanu v generátorovém plynu	%
CO	objemový podíl uhelnatého v generátorovém plynu	%
CO ₂	objemový podíl oxidu uhličitého v generátorovém plynu objemový podíl oxidu uhličitého ve spalínách	%
H ₂	objemový podíl vodíku v generátorovém plynu objemový podíl vodíku ve spalínách	%
H ₂ O	objemový podíl vody v generátorovém plynu objemový podíl vody ve spalínách	%
N ₂	objemový podíl dusíku v generátorovém plynu	%
O _{min}	množství teoretického kyslíku	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
O ₂	referenční obsah kyslíku ve spalínách objemový podíl kyslíku ve spalínách	%
P	výkon kotle	kW
P _H	statický komínový tah	Pa
P _{SK}	výkon spalovací komory	kW
P _R	tlaková ztráta komínu	Pa
P _{ref}	požadavek na výkon kotle	kW
P _V	výkon výměníku	kW
P _Z	účinný komínový tah	Pa
Q _c	celková roční spotřeba tepla	MJ · rok ⁻¹
Q _i	výhřevnost generátorového plynu	MJ · m _N ⁻³
Q _k	množství spalín	$m_N^3 \cdot s^{-1}$
Q _p	množství generátorového plynu	$m_N^3 \cdot s^{-1}$
Q _{vz}	množství vzduchu	$m_N^3 \cdot s^{-1}$
S _E	součinitel bezpečnosti pro proudění spalín v komíně	-
V _{CO₂}	množství oxidu uhlíku ve spalínách	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V ₂₀	přepočet množství vzduchu na danou teplotu	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V ₁₆₀	přepočet množství spalín na danou teplotu	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{N₂}	množství dusíku ve spalínách	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{H₂O}	množství vody ve spalínách	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{sp}	množství skutečných spalín vlhkých	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{sp} ^s	množství skutečných spalín suchých	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{sp,ned} ^s	množství teoretických spalín při nedokonalém spalování	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{sp,t} ^s	množství teoretických spalín suchých	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{vz}	množství skutečného vzduchu vlhkého	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{vz} ^s	množství skutečného vzduchu suchého	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
V _{vz,t} ^s	množství teoretického vzduchu suchého	$m_N^3 \cdot m_N^{-3}$
c _k	tepelná kapacita spalín	$\text{kJ} \cdot m_N^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
d _k	vnitřní průřez komínu	m
h	výška komínu	m
k	součinitel prostupu tepla	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
k _{max}	maximální objemový podíl CO ₂ v suchých spalínách	%
k' _{max}	objemový podíl CO ₂ v suchých spalínách při nedokonalém spalování	%

l	délka trubky výměníku	m
l_1	tloušťka opláštění	m
l_2	tloušťka izolace	m
l_3	tloušťka vodního dvoupláště	m
m_p	spotřeba paliva	$\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}$
n	součinitel přebytku spalovacího vzduchu	-
p_b	atmosférický tlak vzduchu	kPa
p_k	tlak spalin	kPa
p'_{\max}	objemový podíl CO v suchých spalinách při nedokonalém spalování	%
p''	tlak syté páry	kPa
q	tepelný tok	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
q_{\max}	maximální objemový podíl O ₂ v suchých spalinách	%
q'_{\max}	objemový podíl O ₂ v suchých spalinách při nedokonalém spalování	%
r_k	plynová konstanta spalin	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
s	stěna trubky	m
t_k	teplota spalin na výstupním hrdle kotle	°C
t_{k1}	teplota spalin na vstupu do výměníku	°C
t_{NV}	teplota vody na vstupu do výměníku	°C
t_{sk}	teplota spalin ve spalovací komoře	°C
t_{st}	teplota stěny opláštění	°C
t_v	teplota vody na výstupu z výměníku	°C
t_{vz}	teplota vzduchu v okolí	°C
w_k	rychlost spalin	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Δt_{stf}	střední teplota výměníku	°C
Ω_{\min}	množství teoretického nespotřebovaného kyslíku při nedokonalém spalování	$\text{m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$
α_k	součinitel přestupu tepla na straně spalin	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_v	součinitel přestupu tepla na straně vodě	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
α_{vz}	součinitel přestupu tepla na straně vzduchu	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
η	vzduchový faktor	-
η_{ref}	požadavek na účinnost kotle	%
λ	součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_2	součinitel tepelné vodivosti izolace	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
v	součinitel vlhkosti	-
ξ	součinitel místních ztrát	-
ξ_k	ztráta komínová	%
ξ_{NP}	ztráta chemickým nedopalem	%
ξ_{NT}	ztráta mechanickým nedopalem	%
ρ_{160}	přepočet hustoty spalin na danou teplotu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_k	hustota spalin	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_{vz}	hustota vzduchu	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
φ	relativní vlhkost vzduchu	%
ψ	součinitel tření v komíně	-

Tab. 1. Seznam použitého značení.

1. Úvod

Biomasa je nejstarší zdroj energie, kterou lidstvo po tisíciletí využívalo a dodnes využívá pro vytápění a vaření, pro výrobu páry, v metalurgii, k výrobě plynu atd. Od poloviny 19. století byla biomasa vytlačována fosilními palivy z důvodu jejich nízké ceny a dobré dostupnosti zásob paliva. V poslední době dochází k obnově zájmu o biomasu jakožto o obnovitelný zdroj energie. Důvodem je možnost vyčerpání zásob fosilních paliv, což je spojeno s neustálým růstem cen energie. Dalším důvodem jsou požadavky na ekologii.

Využití biomasy je z hlediska ekologie (bilance CO_2) neutrální proces, protože vzniká pouze takové množství CO_2 , které bylo spotřebováno k jejímu růstu. Tím se tedy nepodílí na tvorbě skleníkového efektu, jako je tomu u využívání fosilních paliv. Další výhodou je využití biomasy jako lokálního obnovitelného paliva, což zajišťuje práci v blízkém okolí a zamezuje závislost na dovozu.

Se zpřísnujícími se požadavky na ochranu ovzduší dochází ke snížení tvorby škodlivých látek ve spalínách při spalování biomasy a nástupu efektivnějších technologií spalování. Mezi ně patří zplyňování biomasy.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a popisem zplyňovacího kotle s využitím zplyňování biomasy pro vytápění rodinných domů.

Cílem této práce je navrhnout a otestovat zplyňovací kotel o výkonu 25 kW, který svými parametry splní 4. emisní třídu dle normy ČSN EN 303-5 (koncentrace CO maximálně 1200 mg.m^{-3} , koncentrace C_xH_y maximálně 50 mg.m^{-3} , minimální účinnost kotle).

Vyrobený prototyp bude následně odzkoušen a výsledky měření budou porovnávány s navrženými parametry.

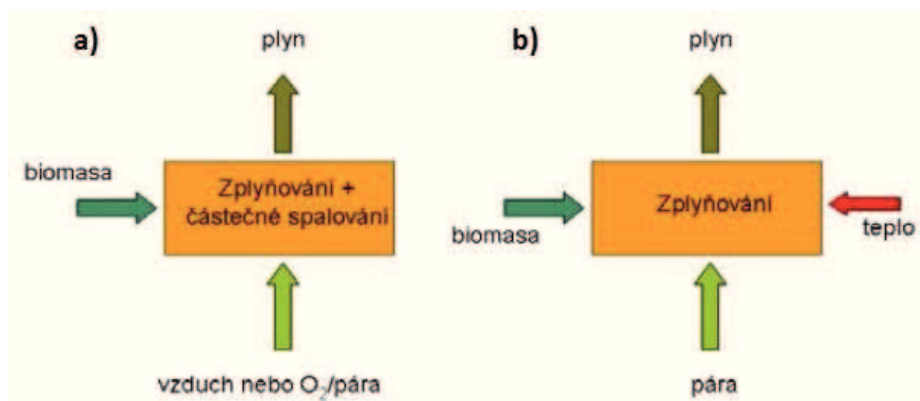
2. Zplyňování biomasy

Proces zplyňování je termochemická přeměna paliva, při které dochází k oxidaci uhlovodíků a vody obsažené v palivu a k jejich následné redukci na hořlavé plyny (CO , H_2 , CH_4), destilační produkty (dehtové látky) a minerální zbytek (popel). Proces probíhá při vysokých teplotách v generátoru za přístupu kontrolovaného množství zplyňovacího media (vzduch nebo vodní pára).

Při zplyňování probíhá celá řada procesů, mezi které patří:

- tepelný rozklad paliva na plyn (zplyňování), kondenzující páry (dehtování) a dřevěné uhlí (pyrolýza)
- následné tepelné štěpení par na plyn
- zplyňování pevného uhlíku vodní parou nebo oxidem uhličitým
- částečná oxidace hořlavých plynů a pevného uhlíku [1]

Zplyňování je v souhrnu endotermní proces, pro jeho průběh se přivádí teplo. Potřebné teplo se získává přímo v generátoru částečným spálením paliva (autotermní – přímé zplyňování) nebo se teplo přivádí z okolního prostředí (alotermní – nepřímé zplyňování).



Obr. 1. Zplyňování, autotermní (a), alotermní (b) [2].

Při autotermním zplyňování se do generátoru přivádí kyslík pro částečné spalování paliva, které pokrývá spotřebu tepla pro zplyňování. Nejčastěji se používá vzdušný kyslík, přičemž dochází ke smíchání generátorového plynu s dusíkem ze vzduchu. Tímto dochází ke snížení výhřevnosti plynu, která se pohybuje v rozmezí od 2,5 do 5 $\text{MJ} \cdot \text{m}_\text{N}^{-3}$.

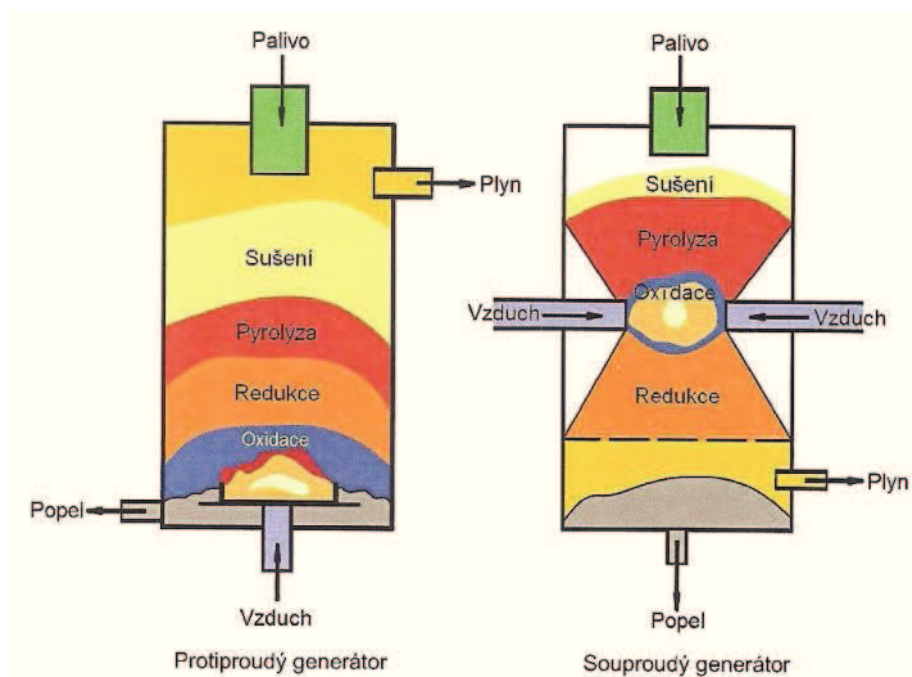
Při alotermním zplyňování je generován plyn o vyšší výhřevnosti (až $14 \text{ MJ.m}_\text{N}^{-3}$). Nevýhodou je přívod tepla z okolního prostředí (otop stěn generátoru), které je zajištěno předejhřevem zplyňovacího media a paliva, což vyžaduje složitější zařízení s vyššími investičními náklady. Zplyňovacím médiem při alotermním zplyňování je většinou vodní pára.

Výhody zplyňování biomasy:

- přeměna pevného paliva s velkým měrným objemem na plynné palivo s možností spalování ve spalovacím zařízení
- použití kogenerace s vyšším teplotenským modulem, což vede ke snížení investičních a provozních nákladů na jednotku elektrického výkonu
- různá alternativní pevná paliva

2.1 Procesy při zplyňování

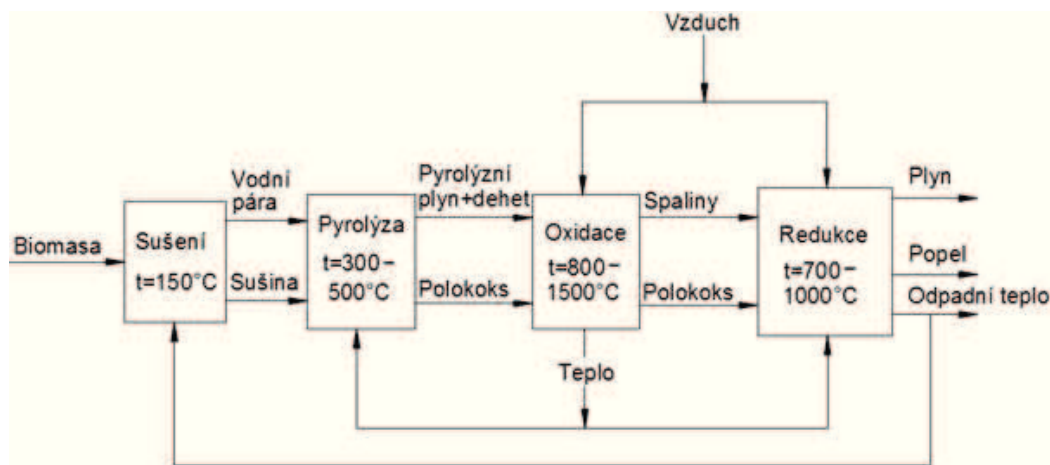
Zplyňování je komplexní termochemický proces, při kterém dochází k celé řadě chemických reakcí. Jednotlivé reakce procesu jsou prostorově a časově rozděleny do zón pouze u generátoru s pevným ložem. U generátoru s unášivým proudem je jejich lokalizace nezřetelná.



Obr. 2. Zóny zplyňovacích generátorů s pevným ložem [1].

Celý proces zplyňování se skládá z následujících pochodů:

- sušení – ohřátí paliva a odpaření vlhkosti z paliva
- pyrolýza – tepelný rozklad paliva na prchavé hořlaviny, kondenzující páry a pevný uhlík, následné tepelné štěpení par na plyn
- oxidace – částečná oxidace hořlavých plynů a pevného uhlíku
- redukce – zplyňování pevného uhlíku parou nebo oxidem uhličitým [1]



Obr. 3. Fáze procesu zplyňování [1].

Reakce v jednotlivých zónách ovlivňují zejména:

- provozní teplota
- provozní tlak
- obsah vlhkosti v palivu a ve zplyňovacím mediu
- doba setrvání hořlavých plynů v generátoru [1]

2.2 Sušení

V sušící zóně se nejprve palivo ohřeje. Při teplotách do 200 °C dochází k odpaření vlhkosti z paliva. Teplo potřebné pro sušení paliva se získává jako část tepla uvolněné v oxidační reakci. Čím vyšší vlhkost palivo má, tím více se snižuje celková účinnost přeměny chemické energie paliva na chemickou energii generátorového plynu. Vzniklá vodní pára dále reaguje v redukční zóně generátoru (soproudý generátor) nebo přejde do generátorového plynu (protiproudý generátor).

2.3 Pyrolýza

V pyrolýzní zóně dojde k uvolňování prchavé hořlaviny z paliva bez přístupu oxidačního media (vzduch) v rozsahu teplot 300 až 500 °C. Vznikají produkty pevné (dřevěné uhlí), kapalné (dehtové látky) a plynné (H_2 , CO, CO_2 , CH_4), jejichž poměr je dán chemickým složením paliva a parametry pyrolýzy.

Pevné produkty získané pyrolýzou obsahují 80 až 85 % pevného uhlíku (dřevěné uhlí), 15 až 20 % prchavých hořavin a 0 až 2 % popele. Obsah popele závisí na obsahu popelovin v palivu, který je dán směsí různých chemicky vázaných minerálů v palivu. Obsah prchavých hořavin závisí na parametrech pyrolýzy (teplota, tlak).

Plynné produkty vznikají při rychlé pyrolýze a představují přibližně 5 % obsahu energie biomasy a v případě pomalé pyrolýzy 25 až 30 %. Při teplotě nad 500 °C se produkuje 75 až 90 % prchavých hořavin. Jejich hlavními složkami jsou CO, CO_2 , CH_4 , H_2 a H_2O (až 95 %), zbývající podíl představuje N_2 .

Hlavními parametry ovlivňujícími průběh pyrolýzy jsou:

- teplota pyrolýzy – se vzrůstající teplotou roste podíl plynných produktů
- rychlost ohřevu – při rychlém ohřevu vznikají především kapalné produkty, pomalý ohřev zajišťuje vznik plynných produktů a menší množství kapalných produktů
- tlak – v kombinaci zvýšeného tlaku a teploty kolem 500 °C jsou produkty pyrolýzy především kapalné, při jiných teplotách za zvýšeného tlaku roste podíl plynných a pevných produktů
- granulometrie a vlhkost paliva
- doba setrvání paliva v oblasti pyrolýzy – delší doba setrvání má za následek nižší podíl kapalných produktů v plynu [1]

2.4 Oxidace

V procesu zplyňování se může vyskytovat oxidační zóna. Záleží na tom, zda zplyňování vyžaduje částečné spalování paliva (autotermní zplyňování), nebo ji nevyžaduje (alotermní zplyňování).

Při použití kyslíku nebo vzduchu jako zplyňovacího media je stechiometrický koeficient kyslíku mezi 0,3 až 0,5. V oblasti vstupu tohoto media se vytváří oxidační zóna s teplotou 800 až 1500 °C. Oxidace pevného uhlíku i plynných produktů pyrolýzy (CO, H₂, CH₄) probíhá v daném místě dle následujících rovnic [1]:

Částečná oxidace pevného uhlíku:



Úplná oxidace pevného uhlíku:



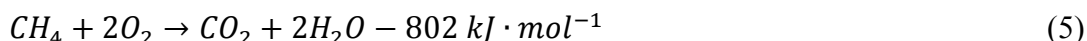
Oxidace oxidu uhelnatého:



Oxidace vodíku:



Oxidace metanu:



Potřebnou reakcí je vznik oxidu uhelnatého z pevného uhlíku (1), která odpovídá přeměně pevné biomasy v generátorový plyn. Úplná oxidace uhlíku (2) je potřebná pouze k dodávání tepla průběhu celého procesu zplyňování. Přestože reakce (3) až (5) dodávají reakční teplo, patří mezi nepotřebné, protože oxid uhličitý a voda nejsou spalitelné a snižují tak výhřevnost generátorového plynu.

Průchod pyrolýzních produktů přes oxidační zónu (u souproutého generátoru) velmi významně snižuje obsah dehtových látek v generátorovém plynu.

2.5 Redukce

Většina spalitelných látek v generátorovém plynu vzniká heterogenními nebo homogenními reakcemi.

Heterogenní reakce probíhají mezi látkami různých skupenství. Hlavní reakce probíhají mezi pevným produktem pyrolýzy a plynnými produkty vzniklými v zónách sušení, pyrolýzy a oxidace. Přítomnost těchto reakcí svědčí o kvalitě procesu zplyňování a o rovnoměrném přístupu oxidačního media a reakčních plynů (CO_2 , H_2O) k pevnému uhlíku [1].

Boudouardova reakce:



Heterogenní reakce vzniku vodního plynu:



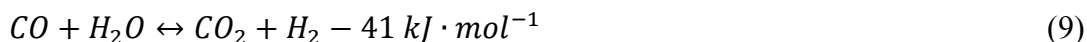
Heterogenní vznik metanu:



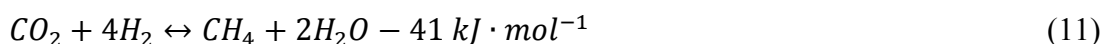
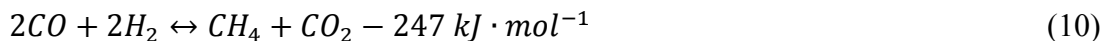
Reakce (6) a (7) jsou rozhodující pro vznik generátorového plynu. Probíhají velmi pomalu při teplotách 700 až 800 °C, proto je tento rozsah teplot nejnižší možnou teplotou, při níž lze úspěšně provádět zplyňování. Reakce (8) probíhá velmi pomalu a metan v plynu vzniká většinou z prchavé hořlaviny. Všechny reakce probíhají bez přítomnosti kyslíku, proto se snižuje teplota a většina přítomného uhlíku je spálena či redukována na oxid uhelnatý, případně odchází z generátoru ve formě nedopalu v popelu.

Současně s heterogenními reakcemi probíhají reakce homogenní, což jsou reakce mezi sloučeninami ve stejném skupenském stavu a probíhají mezi plynnými produkty ze zóny sušení, pyrolýzy a oxidace.

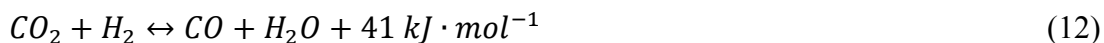
Homogenní reakce vodního plynu [1]:



Homogenní vznik metanu:



Homogenní redukce oxidu uhličitého:



Generátorový plyn se skládá ze žádoucích plynných produktů (CO , H_2 a CH_4), dále obsahuje H_2O , CO_2 a N_2 . Přesné složení konečného plynu je dáno rovnovážnou konstantou chemické reakce, která určuje stav mezi výchozími látkami obsaženými v palivu a produkty účastnících se chemických reakcí. Tento stav je závislý na teplotě a tlaku v reakčním prostředí.

Rovnovážná konstanta se určuje pomocí rychlosti a směru reakce. Teoreticky může reakce za vhodných podmínek probíhat v obou směrech. Pokud je rychlost reakce na pravé straně rovnice vyšší než rychlost reakce na straně levé, dochází k přeměně výchozích látek na produkt a reakce poběží do konce (tzv. nevratná reakce). Pokud je reakční rychlost v obou směrech stejná, dochází ke vzniku chemické rovnováhy. V rovnovážném stavu se množství výchozích látek a produktů nemění, i když obě reakce dále probíhají.

Teoreticky všechny chemické reakce dosahují rovnováhy při dostatečně dlouhé době reakcí. Pro každou reakci existují podmínky, za kterých je reakce reverzibilní (tzv. vratná reakce).

Rovnovážná konstanta K_x podle Van't Hoffa je daná vztahem:

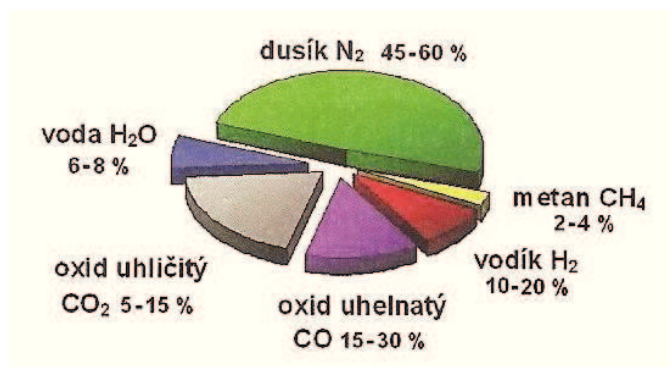
$$\left(\frac{\partial \ln K_x}{\partial p} \right)_T = - \frac{\Delta_R v}{RT} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial \ln K_x}{\partial T} \right)_p = \frac{q_p}{RT^2} \quad (14)$$

Van't Hoffovy rovnice umožňují předvídat změnu tlaku nebo teploty pro dosažení rovnováhy reakce [3].

2.6 Parametry generátorového plynu

Generátorový plyn je směsí hořlavých a nehořlavých plynů. Zastoupení jednotlivých plynů závisí na druhu paliva, jeho typu a provozních podmínkách generátoru (Obr. 4.).



Obr. 4. Složení plynu při autotermním zplyňování vzduchem [1].

2.7 Konstrukční řešení zplyňovacích generátorů

Zplyňovací generátory se rozdělují na základě několika hledisek:

1) Dle konstrukce generátoru (nejrozšířenější způsob dělení generátorů):

- s pevným (sesuvným) ložem – souprroudé, protiproudé, s křížovým tokem
- s fluidním ložem
- s unášivým ložem

2) Dle zplyňovacího media:

- vzduchové
- kyslíkové

3) Dle zdroje tepla pro zplyňování:

- autotermní (přímé zplyňování)
- kyslíkové
- alotermní (nepřímé zplyňování)

4) Dle tlaku v generátoru:

- atmosférické
- tlakové

2.8 Zplyňovací generátor s pevným ložem

Generátor s pevným ložem (sesuvný generátor) má stacionární reakční zónu podepřenou roštem. Palivo se většinou dodává ze shora. Generátory se dělí podle převažujícího směru toku pevných částic a proudu plynu na:

- protiproudé
- souproudé
- křížové

U těchto typů generátorů se často objevují problémy s klenbováním paliva, což vede ke tvorbě plynu o proměnlivém složení. Generátory se provozují při autotermním zplyňování a produkují většinou nízkovýhřevný plyn. Jejich výhodou je relativně jednoduchá konstrukce a robustnost. Nevýhodou je omezení na malé výkony a požadavky na palivo, např. velikost částic paliva (granulometrie), vlhkost a množství popela v palivu.

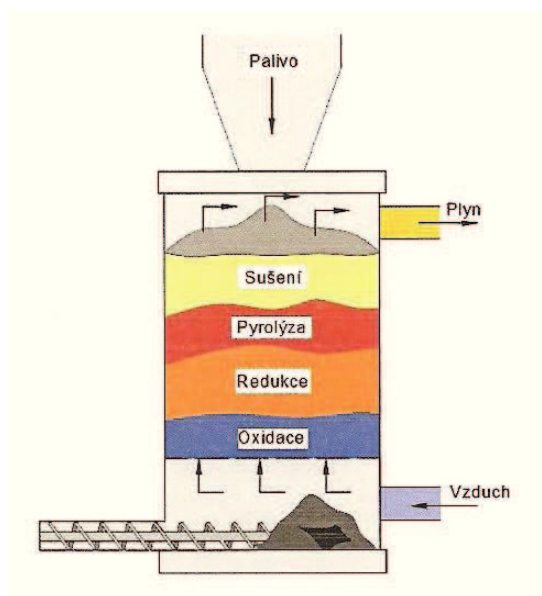
2.8.1 Protiproudý generátor

Konstrukčně nejjednodušším typem generátoru je protiproudý s pevným ložem. Palivo se přivádí do vrchní části generátoru a pohybuje se směrem dolů vlivem zplyňování a odvodu popela. Zplyňovací medium se přivádí do spodní části generátoru, kde dochází k tepelnému rozkladu paliva. Generátorový plyn proudí v protisměru paliva a prochází oxidační, redukční, pyrolýzní a sušicí zónou do horní části generátoru, kde ho opouští.

V sušicí zóně dochází k odpaření vlhkosti z paliva. V pyrolýzní zóně dochází k tepelnému rozkladu paliva na plyn a na pevný uhlík. Teplo pro pyrolýzní a sušicí zónu se přivádí generátorovým plynem a částečně je získáno ze záření při oxidaci paliva. V redukční zóně dochází k redukci oxidu uhličitého na oxid uhelnatý a k redukci vodní páry na vodík.

Hlavní výhodou protiproudého generátoru je vnitřní výměna tepla, která vede k vysoké účinnosti zplyňování. Díky vnitřní výměně tepla je palivo ve vrchní části generátoru vysušeno, proto lze použít palivo s vyšším obsahem vlhkosti (až 30 %).

Nevýhodou je vyšší obsah dehtových látek a pyrolýzních produktů v plynu. Generátorový plyn má výhřevnost až $6 \text{ MJ} \cdot \text{m}_\text{N}^{-3}$ a nízkou výstupní teplotu.



Obr. 5. Protiproudý generátor [1].

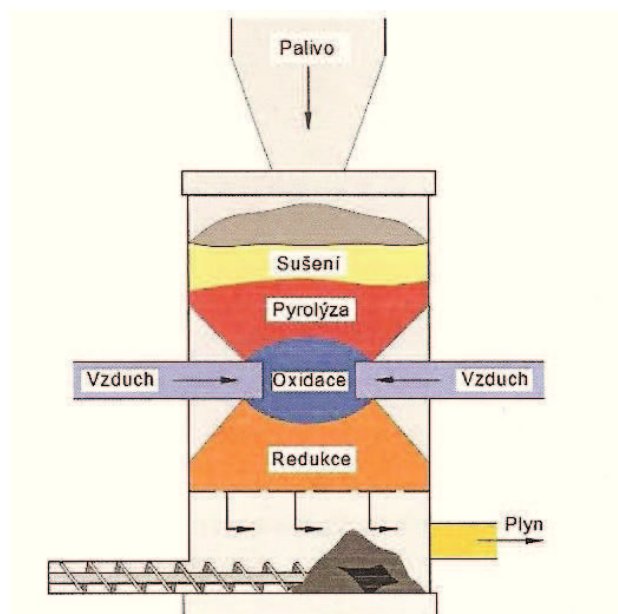
2.8.2 Souproudý generátor

V souproudém generátoru se palivo přivádí do horní části generátoru. Zplyňovací medium se přivádí ze shora nebo ze stran. Generátorový plyn proudí stejným směrem jako palivo a prochází sušicí, pyrolýzní, oxidační a redukční zónou a opouští generátor v jeho spodní části.

V sušicí zóně dochází k odpaření vlhkosti z paliva. V pyrolýzní zóně dochází k tepelnému rozkladu paliva na plyn a na pevný uhlík. Teplo pro pyrolýzní a sušicí zónu se přivádí hlavně zářením při oxidaci paliva. Plyny z pyrolýzy procházejí oxidační zónou, kde jsou spáleny. Po oxidační zóně přecházejí zbývající dehtové látky a produkty spalování (CO_2 a H_2O) do redukční zóny, kde se redukují na CO a H_2 .

Hlavní výhodou souproudého generátoru je výroba plynu s nízkým obsahem dehtových látek. Generátorový plyn má výhřevnost až $5 \text{ MJ.m}_\text{N}^{-3}$.

Mezi nevýhody těchto generátorů patří velké množství popela a prachových částic v plynu, protože plyn prochází přes oxidační zónu, odkud jsou částice unášeny. Vysoká teplota generátorového plynu vede k nižší účinnosti zplyňování. Požadovaná velikost částic paliva je od 4 do 10 cm, aby nedocházelo ke klenbování paliva. Vlhkost paliva by neměla být větší než 25 %.

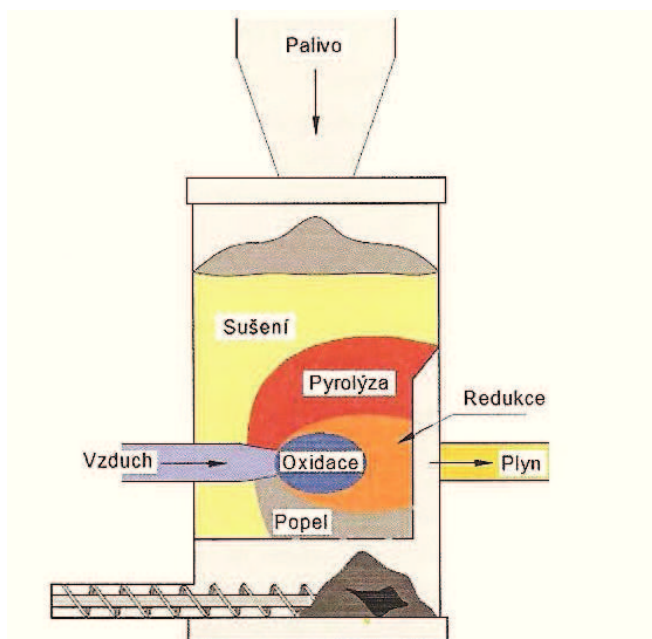


Obr. 6. Souprroudý generátor [1].

2.8.3 Generátor s křížovým tokem

Generátor s křížovým tokem byl původně konstruován pro zplyňování dřevěného uhlí. Výsledné produkty tohoto procesu se vyznačují vysokou teplotou (až 1500 °C), což může vést k lokálním problémům týkajících se teplotní odolnosti materiálu generátoru.

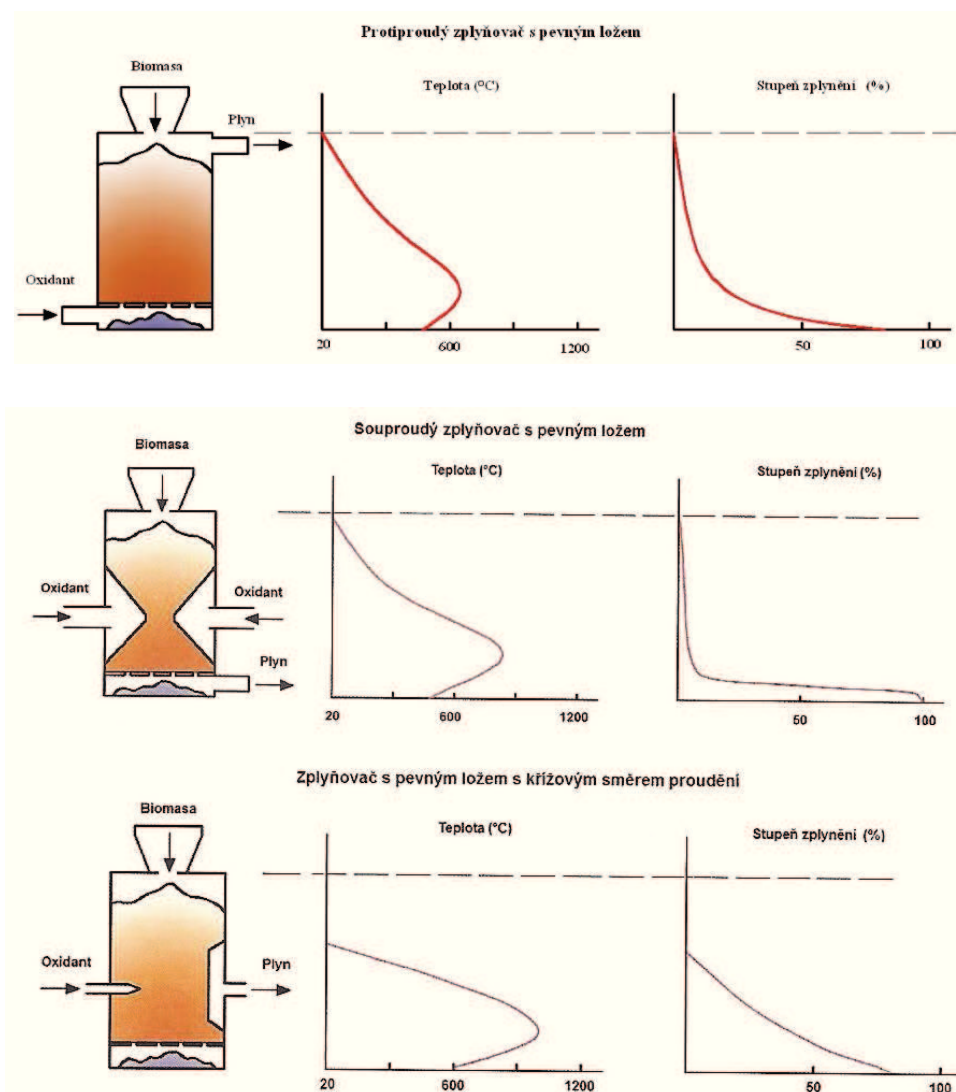
Nevýhodou generátoru je minimální rozklad dehtových látek a potřeba použití velmi kvalitního paliva.



Obr. 7. Generátor s křížovým tokem [1].

2.8.4 Porovnání generátorů s pevným ložem

V Tab. 2. se nachází hlavní charakteristické parametry generátorů s pevným ložem při použití dřeva jako paliva. Hodnoty jsou pouze přibližné, ale udávají základní rozdíly mezi jednotlivými typy zplyňovacích generátorů. Na Obr. 8. jsou patrné závislosti stupně zplynění na teplotě vybraných generátorů.



Obr. 8. Charakteristika zplyňovacích generátorů s pevným ložem [1].

Typ generátoru	Souproudý	Protiproudý	S křížovým tokem
Typ paliva	Dřevo	Dřevo	Dřevěné uhlí
Maximální vlhkost paliva [%]	25	60	20
Maximální obsah popelovin [%]	6	25	0,5 – 1
Rozměr částic paliva [mm]	20 – 100	10 – 100	5 – 20
Teplota výstupního plynu [°C]	700	200 – 400	1250
Obsah dehtu v plynu [g.m _N ⁻³]	0,015 – 0,5	30 – 150	0,01 – 0,1
Citlivost na kolísání výkonu	Vysoká	Nízká	Vysoká
Účinnost [%]	85 – 90	40 – 60	75 – 90
Výhřevnost [MJ.m _N ⁻³]	4,5 – 5	5 – 6	4 – 4,5

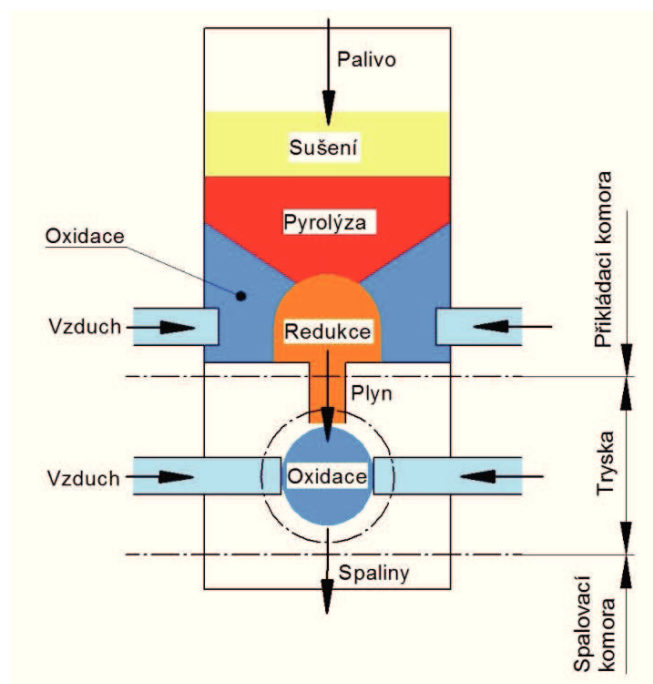
Tab. 2. Charakteristické parametry generátoru s pevným ložem [1].

3. Zplyňovací kotel

Zplyňovací kotel je konstruovaný jako stacionární teplovodní kotel pro vytápění rodinných domů nebo průmyslových budov. Je používán v topných systémech s možností připojení na akumulární nádrž, kdy dochází k úspoře paliva až 25 %. Kotel nesmí být instalovaný v obytných prostorech, ale v samostatných větraných místnostech.

Konstrukčně je kotel rozdělený na dvě komory (příkládací a spalovací) oddělené tryskou a výměníkem, který jako poslední teplosměnná plocha kotle odebírá teplo spalinám.

Na Obr. 9. jsou zjednodušeně znázorněny procesní zóny ve zplyňovacím kotli. V příkládací komoře dochází k autotermnímu zplyňování paliva na principu souproudého generátoru, který je rozepsaný v kapitole 2.8.2. Generátorový plyn z příkládací komory prochází tryskou, kde dochází k jeho oxidaci. Oxidační procesy jsou rozepsány v kapitole 2.4. Vzniklá hořící směs plynů vstupuje do spalovací komory, kde dochází k dokonalému spalování a k přestupu tepla teplosměnným plochám komory.

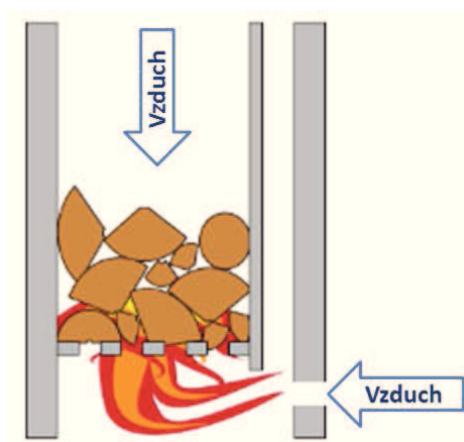


Obr. 9. Zóny zplyňovacího kotle.

3.1 *Princip spodního spalování*

Při spodním spalování dochází k postupnému odhoření spodní vrstvy paliva ve spodní části příkladací komory. Vytvoří se žhavá vrstva, přes kterou se redukují produkty částečného spalování na hořlavé plyny (CO , H_2 , CH_4). Následnou oxidací hořlavých plynů spalovacím vzduchem v prostoru pod žhavou vrstvou dochází k dokonalému spalování.

Palivo, které se nachází nad žhavou vrstvou, se postupně posunuje do prostoru žhavé vrstvy a zajišťuje plynulou dodávku paliva po několik hodin provozu kotle.



Obr. 10. Princip spodního spalování [4].

3.2 Hlavní znaky a výhody zplyňovacího kotle

- Nízké emise – kotel splňuje nejvyšší emisní třídy dle požadavků ČSN EN 303-5.
- Ekologický provoz – během spalování biomasy se uvolňuje stejné množství oxidu uhličitého, které se spotřebuje během jeho růstu, což se nepodílí na hromadění oxidu uhličitého v atmosféře a tvorbě skleníkového efektu.
- Vysoká účinnost – tepelné ztráty kotle jsou minimalizovány tepelnou izolací kotlového tělesa. Rozměrný výměník tepla zajišťuje dostatečné ochlazení spalín.
- Efektivní spalování – přesný poměr paliva a spalovacího vzduchu snižuje spotřebu paliva oproti kotlům s klasickým spalováním.
- Provozní účinnost – několikahodinový provoz kotle klade minimální nároky na obsluhu vzhledem k jeho automatickému provozu.
- Bezpečnost – pro provoz v uzavřených topných systémech je kotel vybaven bezpečnostním výměníkem tepla dle normy ČSN EN 12 828.
- Dlouhá životnost – kotle jsou vyrobeny z jakostní ocele a žáruvzdorné keramiky. Životnost kotle je výrazně prodloužena řízeným spalováním, koncepce zamezuje nadbytečné tvorbě dehtových látek a usazenin.
- Alternativa k plynovému kotli nebo k tepelnému čerpadlu.

3.3 Palivo

Nejčastěji používaným palivem pro zplyňovací kotle je kusové dřevo. Ve dřevě jsou obsaženy chemické prvky ve složení [5]:

- uhlík (asi 50 %)
- kyslík (asi 43 %)
- vodík (asi 6 %)
- malé množství dusíku a nehořlavých látek (minerály)

Uvedené chemické prvky tvoří složky dřeva [5]:

- celulóza (40 až 50 %) s výhřevností $17,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$
- lignit (20 až 30 %) s výhřevností 27 MJ.kg^{-1}
- polysacharidy, hemicelulózy (20 až 30 %) s výhřevností $16,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$
- pryskyřice, vosk, tuky, oleje (až 5 %) s výhřevností 36 MJ.kg^{-1}

Výhřevnost dřeva je tím vyšší, čím více obsahuje pryskyřice a lignitu. Jehličnaté stromy (borovice, jedle, smrk) mají více pryskyřic a lignitu než listnaté stromy (bříza, buk, dub). Na základě vyšší hustoty dřeva listnatých stromů je výhřevnost podle prostorového metru (prm) u listnatých stromů výrazně vyšší než u jehličnatých stromů.

Druh dřeva	Měrná hmotnost	Výhřevnost
	kg.prm^{-1}	MJ.kg^{-1}
Jehličnaté stromy	340	15,6
Listnaté stromy	475	14,6

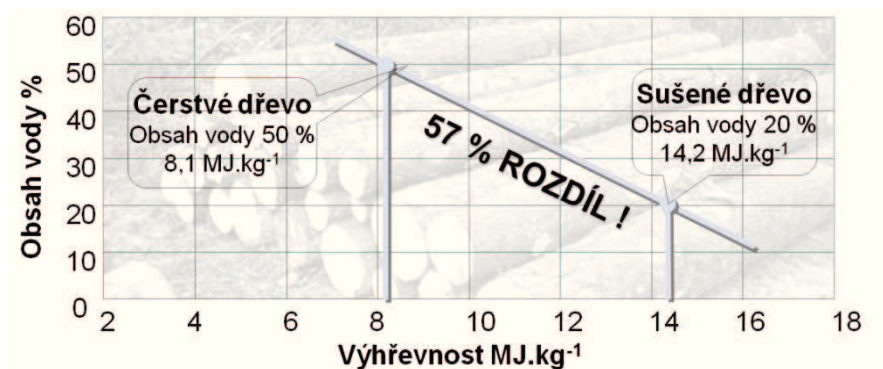
Tab. 3. Výhřevnost různých druhů dřeva při obsahu vody 15 %.

Mezi hlavní vlastnosti určující kvalitu dřeva patří:

- výhřevnost
- obsah vody (vlhkost)
- obsah popelovin a jejich složení
- obsah prchavé hořlaviny

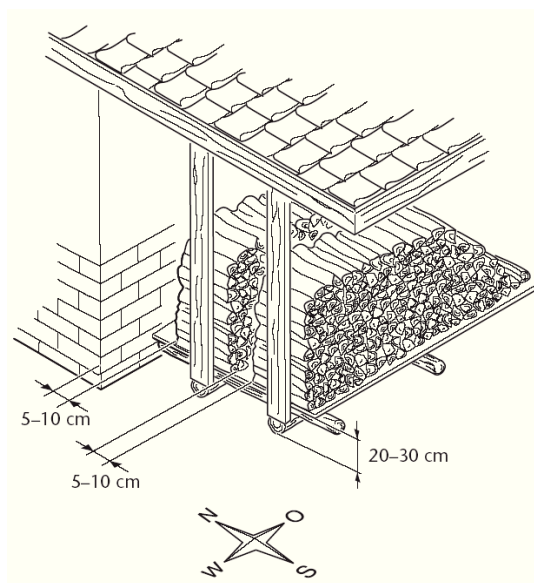
3.3.1 Výhřevnost a obsah vody

Výhřevnost určuje energetickou hodnotu a je silně závislá na obsahu vody ve dřevě, jak je zobrazeno na Obr. 11. Obsah vody ve dřevě vyjadřuje hmotnostní podíl vody k hmotnosti dřeva.



Obr. 11. Výhřevnost dřeva v závislosti na obsahu vody [4].

Čerstvé dřevo obsahuje až 50 % vody. Voda se během spalování odpařuje. Při tomto procesu se část energie obsažené ve dřevě spotřebuje na odpaření vody a nevyužije se pro vytápění. Proto se doporučuje používat dřevo s obsahem vody (vlhkostí) nižší než 20 %. To je dosaženo uskladněním dřeva na dobře větraném, slunném, jižně orientovaném místě chráněném před deštěm. Dobré větrání je nejdůležitější faktor při procesu sušení. Mezi jednotlivými vrstvami dřeva by měly být vytvořeny dostatečné mezery, aby proudící vzduch odváděl vlhkost. Minimální doba pro sušení je 1 rok.



Obr. 12. Skladování dřeva [4].

Spalování dřeva s obsahem vody vyšší než 20 % probíhá při nízké teplotě. Tvoří se dehtové látky, které zanášejí teplosměnné plochy kotle a musí se poté pracně odstraňovat. Výsledkem je spalování s malou účinností při vysoké spotřebě paliva.

3.3.2 Obsah popelovin

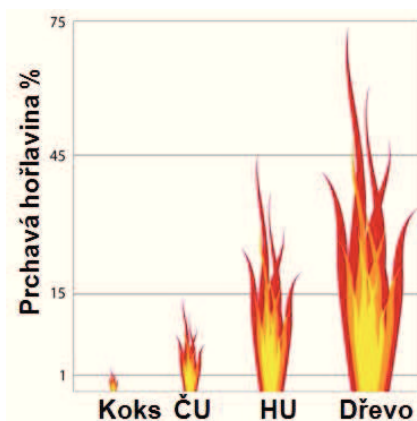
Popeloviny představují množství anorganických látek, které zůstanou po spálení paliva. Dřevo se vyznačuje nízkým obsahem popelovin (až 1 %), proto mají zplyňovací kotle méně složitou soustavu na odvod popelovin než kotle na uhlí, ve kterém je obsah popelovin až 40 %.

Pro zajištění provozu kotle jsou důležité charakteristické teploty popelovin (teplota měknutí, tání a tečení), které jsou dány chemickým složením popela. Složení a tavitelnost popela způsobí tvorbu klenby paliva v příkladací komoře, což ovlivňuje bezporuchový chod kotle. Složení popela zvyšuje obsah dehtových látek v generátorovém plynu, což ovlivňuje životnost kotle.

3.3.3 Obsah prchavé hořlaviny

Dřevo má vysoký podíl prchavé hořlaviny (až 85%). Jakmile se dřevo ohřeje na teplotu 300 až 500° C (oblast pyrolýzy), začne se ze dřeva uvolňovat prchavá hořlavina. Uvolněná prchavá hořlavina částečně oxiduje v oblasti přívodu zplyňovacího media a postupuje do oblasti redukce, kde se redukuje na generátorový plyn.

Vysoký podíl prchavé hořlaviny ve dřevě ovlivňuje délku plamene (Obr. 13.), a proto se volí poměrně dlouhá spalovací cesta pro zajištění dokonalého spalování.

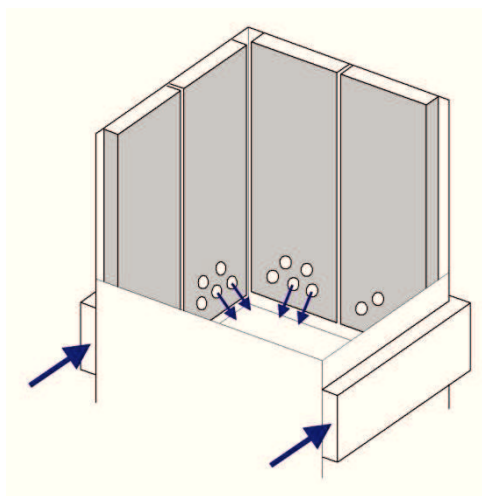


Obr. 13. Délka plamene pro různé druhy paliva [4].

3.4 Příkládací komora

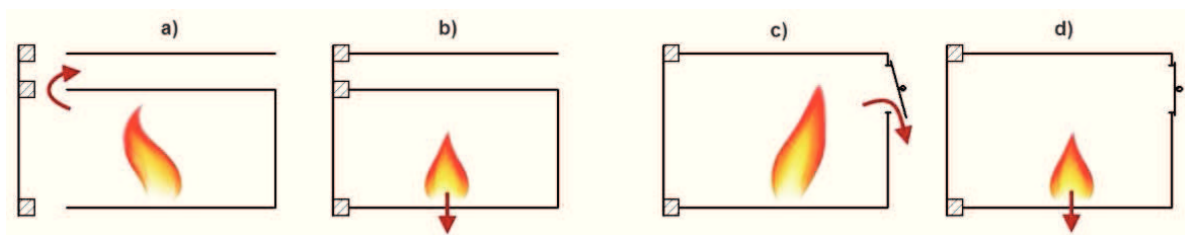
Příkládací komora slouží jako generátor plynů a zásobník paliva. Procesy probíhající v generátoru jsou rozepsány v kapitole 2.1. Generátorový plyn proudí do trysky.

Z důvodu nízké teploty stěny komory dochází k usazování dehtových látek na jejich stěnách. Aby se zamezilo usazování, jsou komory vybaveny krycími plechy po jejich stranách (Obr. 14.). Plechy slouží také k rozvodu spalovacího vzduchu.



Obr. 14. Krycí plechy včetně rozvodu spalovacího vzduchu.

Palivo se ručně vkládá do komory přes dveře. Při otevření dveří dochází k úniku generátorového plynu do okolí. Pro zamezení úniku plynů jsou konstrukčně kotle vybaveny odsávacím kanálem (Obr. 15. a, b) nebo kouřovou klapkou (Obr. 15. c, d).



Obr. 15. Princip zamezení úniku včetně směru toku plynů.

Při konstrukčním provedení kanálem dochází po otevření dveří k nasátí plynů kanálem (a), který zamezuje úniku plynů. Při zavření dveří se uzavírá prostor komory a tím dochází k opětovnému ustálení směru toku plynů (b). Při konstrukčním provedení kouřovou klapkou se nejdříve otevírá klapka, která nasává plyny z komory (c). Potom se

otevírají dveře pro vkládání paliva. Při otevřené klapce nedochází k úniku plynů do místnosti. Při zavření dveří a klapky dochází k opětovnému ustálení směru toku plynů (d).

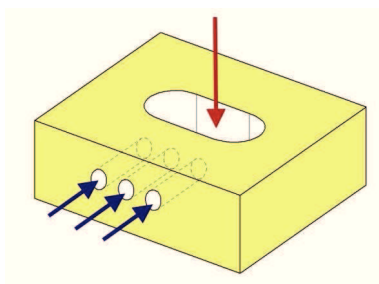
Pro zamezení častého přikládání paliva jsou komory konstruovány s co největším objemem. Provoz kotle potom trvá až několik hodin.

3.5 Tryska

Trysky slouží k míšení generátorového plynu z příkladací komory s předehrátým spalovacím vzduchem a vytváří hořící směs plynů, která společně proudí směrem do spalovací komory (Obr. 16.).

Tryska se vyrábí ze žáruvzdorné keramiky, která dlouhodobě odolává vysokým teplotám kolem 1100 °C. Z důvodu tepelného namáhání jsou trysky vhodně rozděleny do několika částí tak, aby byla umožněna jejich dilatace při tepelném namáhání bez následného poškození. Keramika je několik dní žíhaná ve speciální peci při teplotách až 1350 °C, čímž získá požadované mechanické vlastnosti a zároveň se odstraní veškerá vázaná voda v materiálu. Pro dosažení vysoké pevnosti je keramika navíc zpevněna speciální ocelovou mikrovýztuží.

Keramika umožňuje akumulovat teplo a udržovat vysokou teplotu na konstantní hodnotě. Tím nedochází k ochlazení hořlavé směsi plynů studenou stěnou kotle. Při styku horkých částic se studenou stěnou totiž dochází k předčasnému ochlazení plamene a vzniku dehtových látek a usazenin.

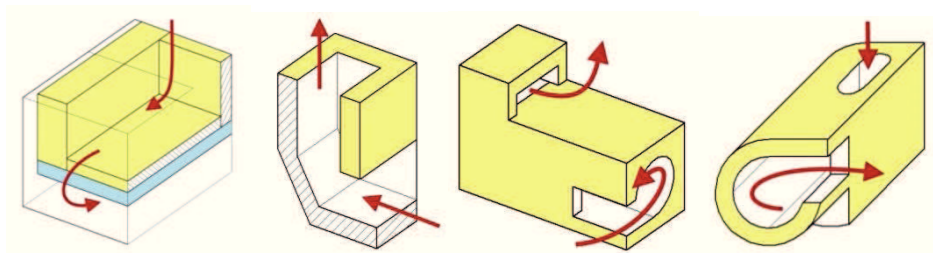


Obr. 16. Tryska včetně vyznačení směru toku plynu (červená šipka) a vstupu spalovacího vzduchu (modré šipky).

3.6 *Spalovací komora*

Spalovací komora slouží k zajištění dokonalého spalování a splnění nejvyšších emisních limitů. Konstrukce spalovací komory se volí dostatečně velká z důvodu zajištění dostatečné teploty a času pro dokonalé spalování s minimálním vznikem škodlivých látek.

Aby nedocházelo k předčasnému ochlazení plamene, je spalovací komora vyzděna žáruvzdornými tvarovkami. Pro zajištění dokonalého promísení spalovacího vzduchu s generátorovým plynem jsou používány speciální tvarovky (Obr. 17.). Spaliny po dohoření dále proudí do výměníku tepla.



Obr. 17. Řezy spalovací komory včetně směru toku plynů.

3.7 *Výměník tepla*

Výměník slouží jako poslední teplosměnná plocha kotle, kde dochází k přestupu tepla ze spalín do kotlové vody a jejímu následnému ochlazení. Teplota spalín nesmí klesnout pod jeho teplotu rosného bodu, aby nedocházelo ke zkondenzování vodní páry a tím ke korozi ocelových materiálů. Naopak při vysoké teplotě spalín na výstupním hrdle kotle dochází ke zbytečnému úniku tepla do komína, což vede ke snížení účinnosti kotle a zvýšení jeho komínové ztráty.

Výměník je konstruovaný jako trubkový – souproudý nebo protiproudý, nebo je konstruovaný jako kanál. Pro zajištění předání většího množství tepla se výměník vybaví vířičemi. Vířiče zpomalují průtok spalín ve výměníku a z důvodu vysoké teploty spalín jsou vyráběny ze žáruvzdorné ocele.

Při nedokonalém spalování dochází k zanesení teplosměnných ploch výměníku popílkem a dehtovými látkami, které zamezují předání tepla kotlové vodě. Dochází pak ke zvýšení teploty spalín na výstupním hrdle kotle a ke snížení účinnosti kotle. Proto je potřeba odstranit nanesený popílek z teplosměnné plochy výměníku jeho pravidelným čištěním.

Čištění výměníku je zajištěno automaticky nebo manuálně. U automatického čištění dochází k rozpořhybování vířičů. Při tomto pohybu dochází k otěru hran vířičů o teplosměnnou plochu výměníku a tím k odstranění nánosů. Automatické čištění je ovládáno servomotorem, který je spojený s vířičemi. U manuálního čištění zajišťuje obsluha odstranění nánosů z teplosměnných ploch výměníku pomocí škrabky nebo kartáče.

3.8 *Spalovací vzduch*

Spalovací vzduch zajišťuje proces zplyňování paliva a následnou oxidaci generátorového plynu. Přívod spalovacího vzduchu je rozdělen na primární a sekundární vzduch.

Primární vzduch podporuje zplyňování v příkladací komoře. K zajištění procesu zplyňování je množství primárního vzduchu dáno stechiometrickým koeficientem kyslíku od 0,3 do 0,5. Sekundární vzduch vstupuje do trysky a podporuje oxidaci generátorového plynu ve spalovací komoře. K zajištění dokonalého spalování je množství sekundárního vzduchu dáno přebytkem od 1,1 do 1,6.

Ke zvýšení účinnosti spalování je výhodné spalovací vzduch přehřát na co nejvyšší teplotu. Pro zajištění kontrolovaného přívodu spalovacího vzduchu jsou vstupy primárního a sekundárního vzduchu regulovány klapkami.

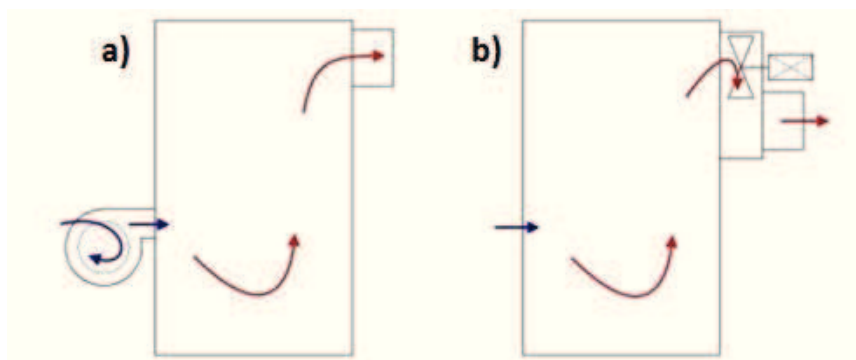
3.9 *Spalovací ventilátor*

Pro řízení procesu spalování se používá ventilátor. Ventilátor je konstrukčně řešený jako přetlakový nebo odtahový (Obr. 18.). Přetlakový ventilátor vhání spalovací vzduch do kotle a strhává spaliny do komína. Naopak odtahový ventilátor nasává vzduch z okolí a odsává spaliny z kotle.

Výkon ventilátoru je řízený teplotou kotlové vody ve vodním plášti nebo teplotou spalin ve sběrači kotle. Regulace výkonu ventilátoru je zajištěna regulačním přístrojem.

Nevýhodou přetlakového ventilátoru je potřeba zajistit dokonalé utěsnění všech možných otvorů tak, aby se zamezilo úniku plynů a spalin do okolí kotle. Při úniku teplého plynu může dojít k jeho oxidaci se vzdušným kyslíkem a tím k výbuchu v blízkosti kotle. Při úniku vyšší koncentrace oxidu uhelnatého dochází k ohrožení života obsluhy. Výhodou přetlakových ventilátorů je jednoduchá regulace spalovacího vzduchu pro zajištění dokonalého spalování.

Nevýhodou odtahového ventilátoru je dlouhá odezva procesu spalování při regulaci výkonu. Oběžné kolo ventilátoru je tepelně namáháno a při překročení meze odolnosti dochází k jeho deformaci. Oběžné kolo zhotovené z uhlíkové oceli pracuje s dostatečnou životností jen do teplot 250 °C. Při vyšších teplotách se používají žáruvzdorné ocele, které zvyšují investiční náklady. Při vysokých teplotách dochází k vyššímu tepelnému namáhání ložisek ventilátoru. Výhodou odtahového ventilátoru je zajištění odvodu spalin z kotle, a proto nedochází k úniku oxidu uhelnatého do okolí a ohrožení života obsluhy.



Obr. 18. Schéma ventilátoru, přetlakový (a) odtahový (b).

3.10 Regulační přístroj

Regulační přístroj se skládá z několika termostatů, teploměrů, hlavního vypínače a napojení na elektrickou síť. Regulační přístroj reguluje výkon kotle a optimalizuje proces spalování pomocí ventilátoru.

Regulace kotle je ovládána kotlovým termostatem dle nastavené teploty kotlové vody (např. 80 °C). Pro zvýšení komfortu obsluhy je regulační přístroj napojený na pokojový termostat, který slouží k jednoduché a spolehlivé regulaci teploty v místnosti.

Optimalizace procesu spalování je ovládána teplotou spalin nebo lambda sondou. Teplota spalin je řízená spalinovým termostatem, který udržuje výkon ventilátoru dle nastavené teploty spalin. Termostat dále slouží k vypnutí ventilátoru po dohoření paliva. Lambda sonda vyhodnocuje obsah kyslíku ve spalinách a tím automaticky nastaví přívod spalovacího vzduchu dle aktuálního stavu procesu spalování. Proces řízení spalování lambda sondou zabezpečuje optimální provozní podmínky, při kterých kotel dosahuje nejvyšší účinnosti a zároveň minimální produkce škodlivých emisí ve spalinách.

K zajištění bezpečnosti ochrany kotle před přetopením slouží bezpečnostní termostat, který při překročení ochranné teploty kotlové vody odpojí ventilátor od elektrické energie.

Oběhová čerpadla jsou ovládána termostaty, které zajišťují cirkulaci vody v topném systému.

Někteří výrobci vybavují přístroj ekvitermní regulací, která nastavuje teplotu kotlové vody v závislosti na venkovní teplotě. Při nižší venkovní teplotě se nastavuje vyšší teplota kotlové vody, aby došlo k rovnováze mezi dodaným teplem a tepelnými ztrátami místnosti a teplota místnosti tak zůstala konstantní.



Obr. 19. Zplyňovací kotel od společnosti Buderus S121-2 [4].

4. Technický návrh

4.1 Specifikace požadavků

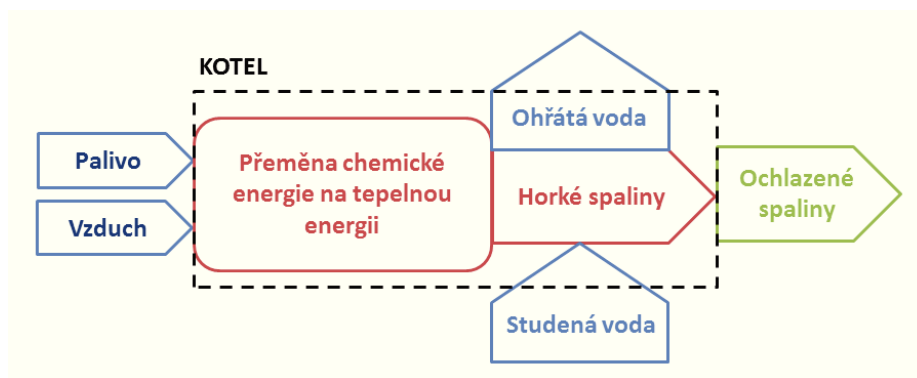
Základní požadavky technického návrhu jsou určeny ze zadání diplomové práce. Požadavky je nutné doplnit, rozšířit a uspořádat podle vlastností technického návrhu. Dále je zapotřebí jednotlivé požadavky seřadit dle důležitosti a určit jejich prioritu splnění. Pro ověření daného požadavku je definovaná oblast (kapitola) jeho potvrzení.

Číslo	Požadavek	Hodnota	Ověření
1.	Funkce		
1.1	Zařízení pro ohřev studené vody	Stacionární kotel	5.1
1.2	Konstrukce pláště	Ocelový svařenec	5.1
1.3	Termochemická přeměna biomasy	Zplyňování	3.
1.4	Regulace výkonu	Řízena teplotou vody v kotli	
2.	Instalace		
2.1	Instalační místnost kotle	Technická místnost, sklep	3.
2.2	Maximální šířka	600 mm	5.1
2.3	Maximální výška	1500 mm	13.1
2.4	Maximální hmotnost	500 kg	13.1
2.5	Připojení na kouřovod	150 mm	5.2
2.6	Připojení na topný systém	G 6/4"	5.2
3.	Technické parametry		
3.1	Jmenovitý výkon	25 kW \pm 8%	7.3.3
3.2	Maximální objem vody v kotli	90 litrů	
3.3	Minimální objem příkladací komory	90 litrů	5.1
3.4	Maximální pracovní tlak	3 bar	13.1
3.5	Maximální pracovní teplota vody	90 °C	
3.6	Minimální pracovní teplota vody	65 °C	
3.7	Maximální teplota spalin na výstupu z kotle	200 °C	11
3.8	Maximální komínový tah	25 Pa	7.4
3.9	Minimální doba hoření	3 hodiny	11
4.	Spalování		
4.1	ČSN EN 303-5, emisní třída 4	CO < 1200 mg·m ⁻³ při 10% O ₂	11.2
4.2	ČSN EN 303-5, emisní třída 4	C _x H _y < 50 mg·m ⁻³ při 10% O ₂	11.2
4.3	ČSN EN 303-5, emisní třída 4	prah < 75 mg·m ⁻³ při 10% O ₂	
4.4	ČSN EN 303-5, emisní třída 4	Účinnost > 80+2 log P	8.4
4.5	Regulace řízení spalování	Odtahový ventilátor	4.4
4.6	Minimální doba roztápění	20 min	
5.	Palivo		
5.1	Kusové tvrdé dřevo	Buk	11
5.2	Maximální délka dřeva	500 mm	5.1
5.2	Maximální obsah vody ve dřevě	20 %	11

Tab. 4. Seznam požadavků.

4.2 Blokové schéma technického procesu

Na Obr. 20. je zjednodušeně ukázáno blokové schéma kotle se vstupními reagenty potřebné ke vzniku požadovaných produktů. Do skupiny reagentů jsou řazeny palivo a vzduch. Působením reagentů dochází v kotli k přeměně chemické energie obsažené v palivu na tepelnou energii. Nositelem tepla jsou spaliny, které předávají vzniklé teplo studené vodě, a tím dochází k jejímu ohřátí. Potom je hlavním produktem kotle ohřátá voda.



Obr. 20. Blokové schéma kotle.

4.3 Schéma zapojení

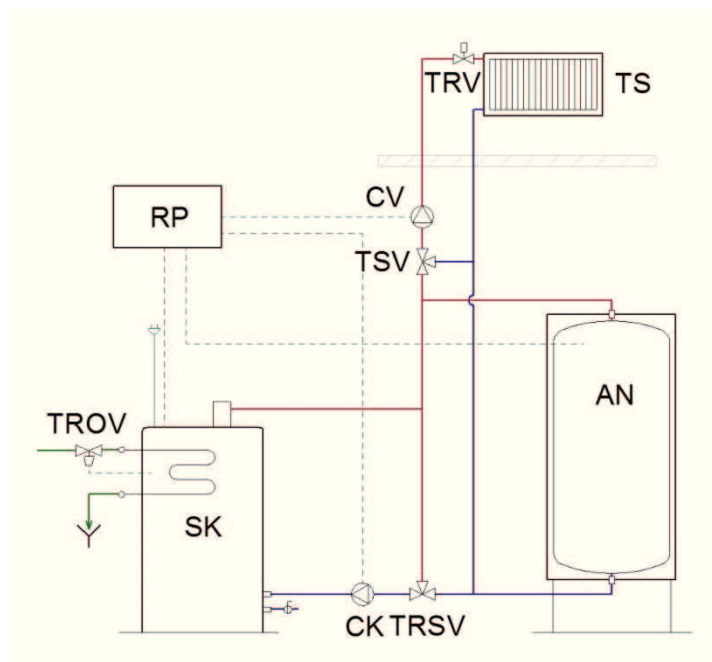
Schéma na Obr. 21. znázorňuje možnost zapojení stacionárního kotle do topného systému. Topný systém je tvořen dvěma okruhy – kotlový a vytápěcí.

Kotlový okruh slouží k ochraně kotle. Teplota stěn kotle chlazených vodou nesmí klesnout pod teplotu rosného bodu spalin. Při nízké teplotě agresivně působí nízkoteplotní koroze na materiály stěn kotle. Koroze vzniká kondenzací odpařené vody ze dřeva. Aby nedocházelo k rychlému ochlazení spalin, musí být teplota vratné vody vyšší než teplota rosného bodu spalin na vstupu do kotle. Teplota vody je řízená termostatickým směšovacím ventilem, který mísí výstupní vodu z kotle se vstupní vodou. Kotlový okruh je systém trubek navzájem propojených s kotlem a termostatickým ventilem. K překonání tlakové ztráty okruhu je zavedeno čerpadlo, které je řízeno regulačním přístrojem.

K dosažení co nejehospodárnějšího provozu kotle se doporučuje kotel napojit na akumulační nádrž. Nádrž slouží k akumulaci přebytečného tepla vzniklého regulací topného systému, který je řízen termostatickým regulačním ventilem. Nádrž se dále využívá k ohřevu užitkové vody, která nachází uplatnění v domácnosti. Objem nádrže se dimenzuje k akumulaci přebytečného tepla alespoň při půldenním provozu kotle při jeho jmenovitém výkonu. Další výhodou zapojení nádrže je využití přebytečného tepla pro potřeby topného systému během odstávky kotle. Po dobu, kdy je kotel mimo provoz, je možné zapojit nádrž na záložní zdroj, např. plynový kotel.

K dosažení optimální cirkulace vody v topném systému se používá čerpadlo řízené regulačním přístrojem.

Dle normy ČSN EN 303-5 musí být kotel chráněn proti přehřátí chladicí smyčkou. Při překročení ochranné teploty kotle spustí termostatický ventil studenou vodu do kotle. Tato voda se ohřeje od přehřáté vody v kotli a je odvedena do odpadu v domácnosti.



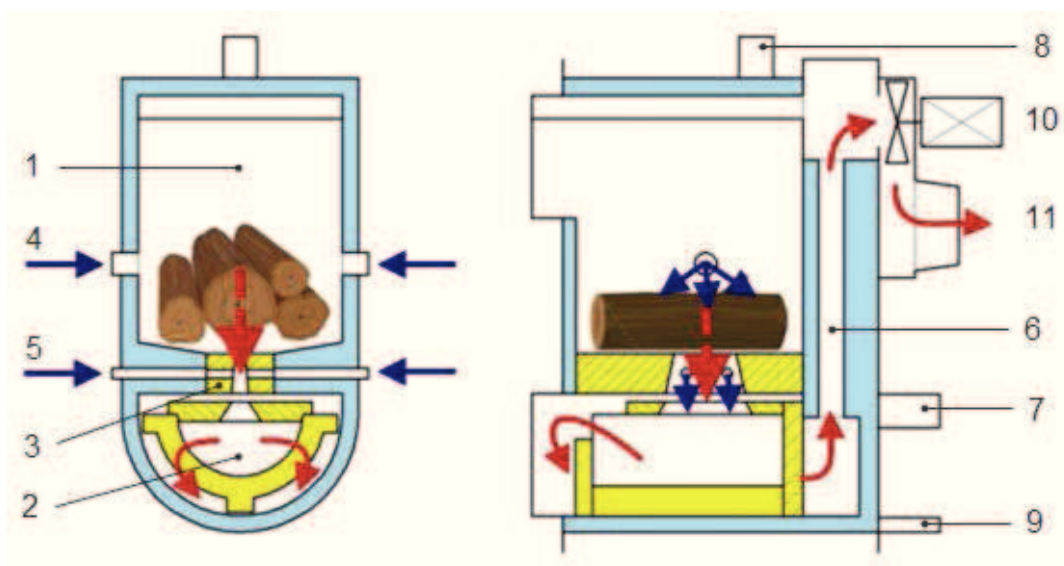
Obr. 21. Schéma zapojení (SK – stacionární kotel, AN – akumulční nádrž, RP – regulační přístroj, TS – topná soustava, CK – oběhové čerpadlo topné vody (kotlový okruh), CV – oběhové čerpadlo topné vody (vytápěcí okruh), TROV – termostatický odpouštěcí ventil, TRSV – termostatický směšovací ventil, TSV – trojcestný směšovací ventil, TRV – termostatický regulační ventil).

4.4 Hrubý návrh

Hrubý návrh znázorňuje koncepci kotle (Obr. 22.). Hlavní koncepci tvoří příkládací komora (1), spalovací komora (2) a výměník (6). Palivo se ručně vkládá do příkládací komory. Zde probíhají procesy sušení a zplyňování paliva s nedostatečným přívodem primárního vzduchu (4). Příkládací a spalovací komora jsou odděleny keramickou tryskou (3), kde probíhá proces spalování s přebytkem sekundárního vzduchu (5). Konečný proces spalování je dokončen ve spalovací komoře. Aby docházelo k dokonalému promísení generátorového plynu se sekundárním vzduchem, je spalovací komora vyzděna žáruvzdornými keramickými tvarovkami. Veškeré tvarovky jsou zjednodušeně označeny žlutou barvou na Obr. 22.

Teplo, které vzniká při spalování paliva, je přenášeno spaliny. K ochlazení spalin dochází ve výměníku. Veškerý pohyb spalin je řízený odtahovým ventilátorem (10). Směr toku spalin v kotli je označen na Obr. 22. červenými šipkami. Ochlazené spaliny jsou dále vedeny do komína přes výstupní hrdlo kotle (11).

Napojení kotle na studenou kotlovou vodu je zajištěno vstupní trubicí (7) v zadní části kotle. Výstup teplé kotlové vody je zajištěn výstupní trubicí (8) v horní části kotle. Napouštění a vypouštění kotle vodou je zajištěno trubicí (9) v zadní části kotle. Celý vodní objem kotle je označen modrou barvou na Obr. 22.



Obr. 22. Hrubý návrh (1 – příkladací komora, 2 – spalovací komora, 3 – tryska, 4 – primární vzduch, 5 – sekundární vzduch, 6 – výměník, 7 – vstupní trubka, 8 – výstupní trubka, 9 – trubka vypouštěcí/ napouštěcí, 10 – ventilátor, 11 – výstupní hrdlo.

5. Konstrukční řešení

5.1 Kotlové těleso

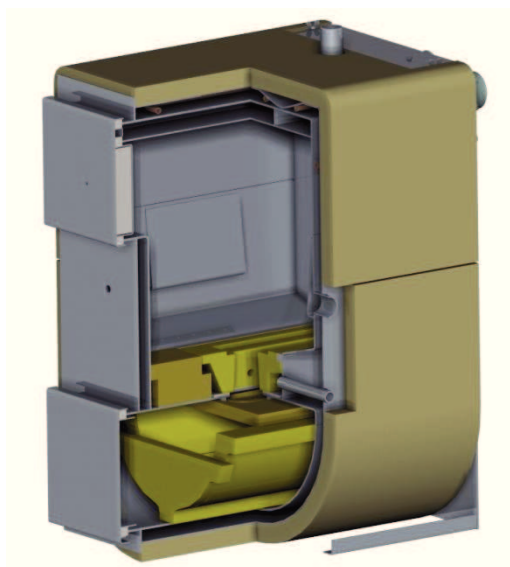
Kotlové těleso je vyrobeno jako dvouplášťový svařenec z ocelového plechu jakostní třídy 11 375 (1.0038). Vnitřní plášť jsou vyrobeny z plechu tloušťky 5 mm. Vnější plášť jsou vyrobeny z plechu tloušťky 3 mm. Vzdálenost mezi vnitřním a vnějším pláštěm je 25 mm pro cirkulaci kotlové vody. Vnější plášť jsou povrchově upraveny ochranným syntetickým nátěrem. Aby se zamezilo úniku tepla do okolí, je vnější plášť opatřen tepelnou izolací.

Přikládací komora má tvar hranolu o objemu 110 litrů, která pokryje potřebu dřeva na 4 hodinový provoz kotle při jmenovitém výkonu. Hloubka komory je řešena pro délku kusového dřeva 500 mm. Šířka komory je řešena pro maximální vnější rozměr kotlového tělesa 600 mm, z důvodu jeho snadnější manipulace. Přívod primárního vzduchu do komory je řešený trubkou, která prochází dvoupláštěm kotle z boční strany. Přívod vzduchu je rozveden krycím plechem v komoře. Spodní část komory je opatřena žáruvzdornými keramickými tvarovkami pro vytvoření žhavé vrstvy z paliva. K zajištění těsnosti komory jsou keramické tvarovky opatřeny těsnicí šňůrou odolávající vysokým teplotám. Těsnicí šňůra zabraňuje úniku generátorového plynu mimo průchod trysky, aby nedocházelo k nedokonalému spalování a tím ke tvorbě škodlivých látek. Stejnou těsnicí šňůrou jsou opatřeny dveře pro přikládání k zamezení úniku plynů do okolí kotle. Pro odsávání plynů z komory při přikládání slouží odsávací kanál v horní části komory.

Keramická tryska je opatřena podélným otvorem pro průchod generátorového plynu a několik bočních kruhových otvorů pro přívod sekundárního vzduchu.

Spalovací komora půlválcového tvaru je obezděna keramickými tvarovkami. Tvarovky v komoře jsou uspořádány do uzavřené mísy, kdy hořlavá směs plynů z trysky proudí směrem ke dveřím. Plyny se odráží od dveří a proudí ve spodní části tvarovek do výměníku tepla.

Pro zabezpečení ochrany kotle před přetopením je kotlové těleso vybaveno chladicí smyčkou v horní části dvoupláště.



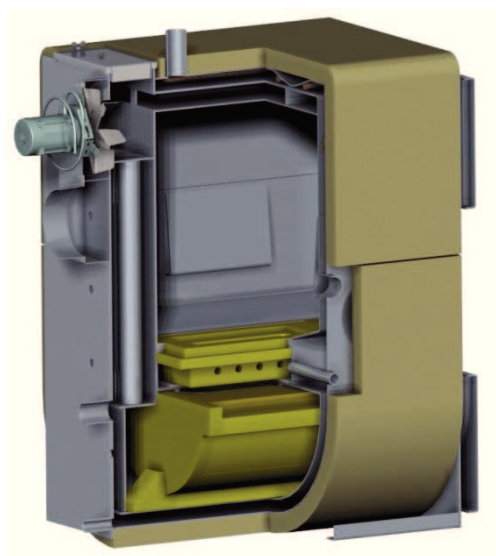
Obr. 23. Přední řez kotlem.

5.2 Výměník kotle

Zadní část kotle se skládá ze svislého trubkového výměníku pro ochlazení spalín. Ochlazené spaliny jsou nasávány vnitřní částí lopatek oběžného kola ventilátoru do sběrače. Vnějšími částmi lopatek oběžného kola jsou spaliny odvedeny do výstupního hrdla kotle. Ve výstupním hrdle jsou spaliny odsávány komínovým tahem do ovzduší. Vnější průměr hrdla pro napojení kouřovodu je 150 mm.

Pro zajištění čištění výměníku je výměník v horní části sběrače opatřený otevíratelným víkem.

Napouštění a vypouštění kotle kotlovou vodou je řešeno trubkou s vnějším závitem G1/2" ve spodní části dvoupláště. Připojení na vstup studené vody z topného systému je řešeno trubkou G6/4" v zadní části kotle. Připojení na výstup ohřáté vody pro topný systém je řešeno trubkou G6/4" v horní části dvoupláště.



Obr. 24. Zadní řez kotlem.

6. Statika spalování

Statika spalování hodnotí hmotové bilance spalovacích rovnic bez ohledu na dobu jejího trvání. Vycházejí z termochemických rovnic ze slučovacích poměrů, z tzv. stechiometrických poměrů [6], kdy neexistuje přebytek ani nedostatek reagentů.

Základními údaji pro navrhování kotle a jeho teplosměnných ploch je množství spalovacího vzduchu a množství spalín.

6.1 Složení generátorového plynu a výhřevnost

Složení generátorového plynu je z důvodu náročnosti měření složité (vysoké teploty), a proto je složení stanoveno experimentálně dle kapitoly 2.6.

N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	CH ₄
%					
50	20	10	10	7	3

Tab. 5. Složení generátorového plynu.

Složení plynu stanovuje objemové podíly složek. Hořlavé složky plynu jsou CO, H₂, CH₄. Naopak nehořlavé složky plynu jsou N₂, CO₂, H₂O.

Výhřevnost generátorového plynu je stanovena objemovým podílem složek v generátorovém plynu a výhřevnosti jednotlivých plynů. Rovnice je dána vztahem:

$$Q_i = \sum Q_i = \text{CO} \cdot Q_{i,\text{CO}} + \text{H}_2 \cdot Q_{i,\text{H}_2} + \text{CH}_4 \cdot Q_{i,\text{CH}_4}$$

$$Q_i = 0,2 \cdot 12,64 + 0,1 \cdot 10,76 + 0,03 \cdot 35,8 = 4,68 \text{ MJ} \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (15)$$

kde $Q_{i,\text{CO}}, Q_{i,\text{H}_2}, Q_{i,\text{CH}_4} [\text{MJ} \cdot \text{m}_\text{N}^{-3}]$ jsou výhřevnosti plynů [7, str. 63]

CO, H₂, CH₄ [1] jsou objemové podíly generátorového plynu (Tab. 5.).

6.2 Množství teoretického suchého vzduchu

Teoretická spotřeba suchého vzduchu je stanovena ze spalovacích rovnic jednotlivých plynů a je dána objemovým podílem hořlavých složek plynů k obsahu kyslíku ve vzduchu. Rovnice je dána vztahem [7]:

$$V_{\text{vz},t}^s = \frac{100}{21} (0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4) = \frac{100}{21} (0,5 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,03) = 1 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (16)$$

Spalování s teoretickou spotřebou vzduchu představuje nejmenší množství vzduchu, které je nutné pro dokonalé spalování 1 m³. Technicky nelze zajistit dokonalé spalování při teoretické spotřebě vzduchu, proto se do spalovacího prostoru přivádí větší množství spalovacího vzduchu, tj. přebytek.

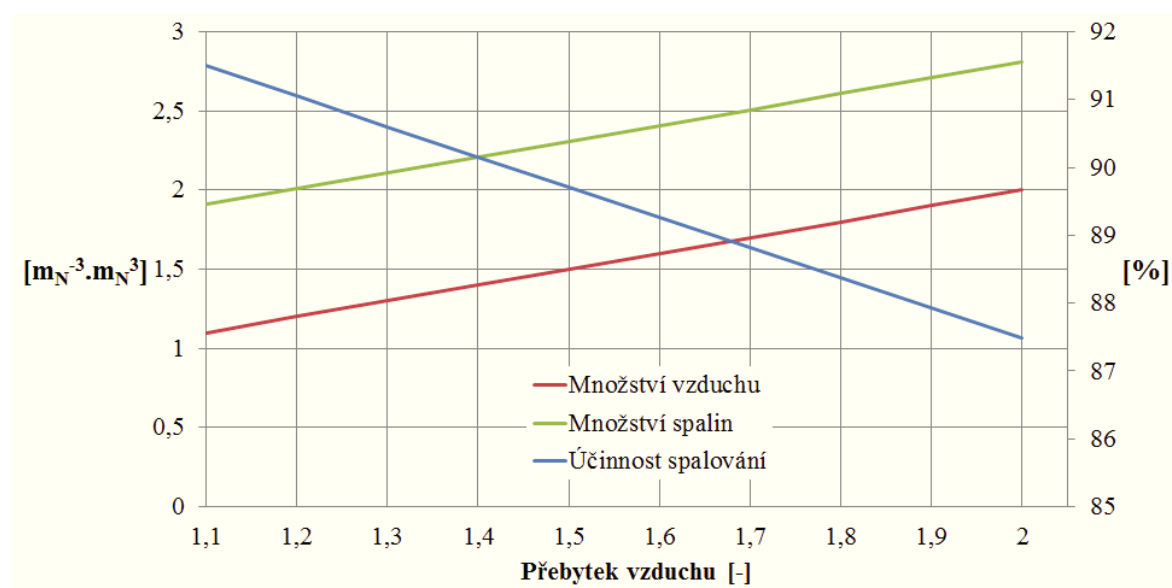
Tento přebytek spalovacího vzduchu je definován poměrem skutečného a teoretického množství. Hodnota součinitele přebytku je zvolená podle zajištění mísení paliva se spalovacím vzduchem. Doporučená hodnota součinitele se stanoví podle naměřeného obsahu kyslíku ve spalinách na konci spalovacího prostoru z důvodu

respektování potřebné volnosti ve volbě přívodu spalovacího vzduchu v jednotlivých fázích spalování. Rovnice je dána vztahem:

$$n = \frac{0,21}{0,21 - O_2} = \frac{0,21}{0,21 - 0,06} = 1,4 \quad [-] \quad (17)$$

kde $O_2 [-]$ je referenční obsah kyslíku naměřený ve spalinách.

Nedostatečné množství spalovacího vzduchu nezajistí dostatečné vyhoření paliva, což zvyšuje ztrátu nedopalem, zatímco nadměrné množství zvýší komínovou ztrátu. V obou případech je výsledkem snížení účinnosti kotle [6].



Obr. 25. Diagram pro stanovení množství vzduchu, spalin a účinnosti spalování v závislosti na přebytku vzduchu.

Diagram na Obr. 25. zjednodušeně ukazuje vliv přebytku vzduchu na množství potřebného vzduchu ke spálení 1 m³ generátorového plynu a množství vzniklých spalin vyprodukované spálením 1 m³ generátorového plynu. Dále má přebytek vzduchu vliv na účinnost spalování, která je stanovena pouze komínovou ztrátou. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze (Tab. 12.).

6.3 Množství skutečného suchého vzduchu

Skutečná spotřeba suchého vzduchu je stanovaná navýšením teoretického suchého vzduchu (16) o součinitel přebytku vzduchu (17). Rovnice je dána vztahem:

$$V_{vz}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 1 \cdot 1,4 = 1,4 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (18)$$

6.4 Množství skutečného vlhkého vzduchu

Pro stanovení skutečného vlhkého vzduchu se nejdříve určí součinitel vlhkosti. Součinitel vlhkosti navyšuje objem spalovacího vzduchu o jeho relativní vlhkost a je dán vztahem:

$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p''}{p_b - \varphi \cdot p''} = 1 + \frac{0,5 \cdot 2,4}{101,2 - 0,5 \cdot 2,4} = 1,012 [-] \quad (19)$$

kde $\varphi[1]$ je relativní vlhkost při teplotě vzduchu 20 °C

$p''[\text{kPa}]$ je tlak syté páry při teplotě vzduchu 20 °C [7, str. 160]

$p_b[\text{kPa}]$ je atmosférický tlak.

Skutečný vzduch vlhký je stanoven navýšením skutečného vzduchu suchého (18) o součinitel vlhkosti (19). Rovnice je dána vztahem:

$$V_{vz} = V_{vz}^s \cdot v = 1,4 \cdot 1,012 = 1,43 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (20)$$

6.5 Množství teoretických spalín suchých

Při stechiometrickém spalování ($n = 1$) obsahují spaliny směsi plynů uhlíku a dusíku. Oxidy uhlíku jsou obsaženy z objemového podílu generátorového plynu (21). Dusík je obsažen z objemového podílu generátorového plynu a obsahu ve spalovacím vzduchu (22). Rovnice jsou dány vztahy:

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 = 0,2 + 0,1 + 0,03 = 0,33 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (21)$$

$$V_{\text{N}_2} = \text{N}_2 + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s = 0,5 + 0,79 \cdot 1 = 1,29 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (22)$$

Množství teoretických spalín suchých je dáno součtem množství oxidu uhlíku (21) a dusíku (22). Rovnice je dána vztahem:

$$V_{sp,t}^s = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} = 0,33 + 1,29 = 1,62 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (23)$$

6.6 Množství skutečných spalín suchých

Skutečné spaliny suché jsou stanoveny navýšením teoretických spalín suchých (23) o přebytečný vzduch obsažený ve spalínách. Rovnice je dána vztahem:

$$V_{sp}^s = V_{sp,t}^s + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 1,62 + (1,4 - 1) \cdot 1 = 2,02 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (24)$$

6.7 Množství skutečných spalín vlhkých

Pro stanovení skutečných spalín vlhkých se nejdříve určí množství vody ve spalínách, které obsahují směsi vodíku, vzniklých objemovým podílem vodíku v generátorovém plynu a je dán vztahem:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + (v - 1) \cdot V_{\text{vz}}^s = 0,1 + 2 \cdot 0,03 + (1,02 - 1) \cdot 1,4 = 0,188 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (25)$$

Množství skutečných spalín vlhkých je dáno součtem skutečných spalín suchých (24) a množství vody ve spalínách (25). Rovnice je dána vztahem:

$$V_{\text{sp}} = V_{\text{sp}}^s + V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,02 + 0,188 = 2,21 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (26)$$

6.8 Přepočty množství na reálnou teplotu

Statické výpočty spalování množství spalovacího vzduchu a spalín jsou prováděny pro normální stav plynů, tj. při teplotě $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ [7, str. 215]. Pro stanovení skutečného množství vzduchu a spalín se přepočítá jejich množství na danou teplotu dle stavových rovnic.

Pro spálení 1 m^3 generátorového plynu je množství spalovacího vzduchu přepočteno na teplotu $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a je dáno vztahem:

$$V_{20} = V_{\text{vz}} \cdot \frac{273+t_{\text{vz}}}{273+t_0} = 1,43 \cdot \frac{273+20}{273+0} = 1,54 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (27)$$

kde $t_{\text{vz}}[^\circ\text{C}]$ je teplota vzduchu v okolí kotle.

Při spálení 1 m^3 generátorového plynu vznikne množství spalín, které je přepočteno na teplotu $160 \text{ }^\circ\text{C}$ a je dáno vztahem:

$$V_{160} = V_{\text{sp}} \cdot \frac{273+t_{\text{k}}}{273+t_0} = 2,21 \cdot \frac{273+160}{273+0} = 3,5 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \quad (28)$$

kde $t_{\text{k}}[^\circ\text{C}]$ je teplota spalín na výstupním hrdle kotle.

6.9 Koncentrace složek ve spalínách

Stanovení konečného procentuálního složení spalín, které je dáno vztahem:

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{sp}}} \cdot 100 = \frac{0,33}{2,21} \cdot 100 = 14,9 \% \quad (29)$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2} + 0,79 \cdot (n-1) \cdot V_{\text{vz,t}}^{\text{s}}}{V_{\text{sp}}} \cdot 100 = \frac{1,29 + 0,79 \cdot (1,4-1) \cdot 1}{2,21} \cdot 100 = 72,4 \% \quad (30)$$

$$\text{O}_2 = \frac{0,21 \cdot (n-1) \cdot V_{\text{vz,t}}^{\text{s}}}{V_{\text{sp}}} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (1,4-1) \cdot 1}{2,21} \cdot 100 = 3,8 \% \quad (31)$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{sp}}} \cdot 100 = \frac{0,188}{2,21} \cdot 100 = 8,5 \% \quad (32)$$

6.10 Ostwaldův spalovací trojúhelník

Sestavení trojúhelníku (Obr. 26.) umožňuje určit dokonalost spalování při znalosti příslušných složek v suchých spalínách (CO_2 , CO , O_2) a přebytku spalovacího vzduchu. Přebytek pro grafickou přímku dokonalého spalování je stanovený vzduchovým faktorem, který je dán vztahem [8]:

$$\eta = \frac{1}{n} [-] \quad (33)$$

Při znalosti dvou libovolných složek lze z trojúhelníku určit zbývající dvě složky.

A) Dokonalé spalování

Teoretické množství spotřebovaného kyslíku při dokonalém spalování je dáno vztahem:

$$\begin{aligned} O_{\min} &= 0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 = 0,5 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,03 = \\ &0,21 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{m}_\text{N}^{-3} \end{aligned} \quad (34)$$

Bod A trojúhelníku na Obr. 26 je stanoven maximálním objemovým podílem CO_2 v suchých spalínách, který je dán vztahem:

$$k_{\max} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{sp,t}}^{\text{s}}} \cdot 100 = \frac{0,33}{1,62} \cdot 100 = 20,4 \% \quad (35)$$

Bod B trojúhelníku na Obr. 26. je stanoven maximálním objemovým podílem O_2 v suchých spalínách, který je označen q_{\max} a dán hodnotou 21 % [8].

B) Nedokonalé spalování

Při nedokonalém spalování je menší spotřeba kyslíku (Ω_{\min}) než při spalování dokonalém. Uhlík při spalování oxiduje na oxid uhelnatý a vodík na vodní páru. Přebytný kyslík přechází do spalin.

Teoretické množství nespotřebovaného kyslíku při nedokonalém spalování je dáno vztahem:

$$\Omega_{\min} = 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot CH_4 = 0,5 \cdot 0,1 + 1,5 \cdot 0,003 = 0,095 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (36)$$

Teoretické množství suchých spalin při nedokonalém spalování je dáno vztahem:

$$V_{\text{sp, ned}}^s = CO_2 + CO + N_2 + V_{\text{vz, t}}^s - \Omega_{\min} = 0,1 + 0,2 + 0,5 + 1 - 0,095 = 1,7 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3} \quad (37)$$

Svislá souřadnice bodu C na Obr. 26. je stanovena objemovým podílem oxidu uhličitého v suchých spalinách při nedokonalém spalování, který je dán vztahem:

$$k'_{\max} = \frac{CO_2}{V_{\text{sp, ned}}^s} \cdot 100 = \frac{0,1}{1,7} \cdot 100 = 5,9 \% \quad (38)$$

Vodorovná souřadnice bodu C je stanovena objemovým podílem kyslíku v suchých spalinách při nedokonalém spalování, který je dán vztahem:

$$q'_{\max} = \frac{O_{\min} - \Omega_{\min}}{V_{\text{sp, ned}}^s} \cdot 100 = \frac{0,21 - 0,095}{1,7} \cdot 100 = 6,8 \% \quad (39)$$

Objemový podíl oxidu uhelnatého v suchých spalinách při nedokonalém spalování je dán vztahem:

$$p'_{\max} = \frac{CO}{V_{\text{sp, ned}}^s} \cdot 100 = \frac{0,2}{1,7} \cdot 100 = 11,8 \% \quad (40)$$

Průsečík souřadnic stanoví bod C. Při propojení bodů A, C je trojúhelník rozdělen na dvě oblasti. Vpravo je přebytek vzduchu, vlevo nedostatek vzduchu, při dokonalém a nedokonalém spalování.

Stanovení hustoty spalin:

$$\rho_k = N_2 \cdot \rho_{N_2} + CO_2 \cdot \rho_{CO_2} + O_2 \cdot \rho_{O_2} + H_2O \cdot \rho_{H_2O} = 0,724 \cdot 1,25 + 0,149 \cdot 1,98 + 0,038 \cdot 1,43 + 0,085 \cdot 0,8 = 1,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (42)$$

kde $\rho_{N_2}, \rho_{CO_2}, \rho_{O_2}, \rho_{H_2O} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ jsou hustoty plynů [7, str. 70].

Přepočet hustoty spalin na teplotu spalin na výstupním hrdle kotle:

$$\rho_{160} = \rho_k \cdot \frac{273+t_0}{273+t_k} = 1,3 \cdot \frac{273+0}{273+160} = 0,82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (43)$$

Stanovení tlaku spalin ze stavové rovnice:

$$p_k = \rho_{160} \cdot r_k(273 + t_k) = 0,82 \cdot 292(273 + 160) = 103,6 \text{ kPa} \quad (44)$$

Stanovení parciálního tlaku vodní páry:

$$p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}^s + V_{H_2O}} \cdot p_k = \frac{0,188}{2,02+0,188} \cdot 103,6 = 8,8 \text{ kPa} \quad (45)$$

Při parciálním tlaku vodní páry 9 kPa je odvozená teplota 45 °C [7, str. 151]. Teplota vodní páry stanovuje minimální teplotu napájecí vody kotle pro zamezení kondenzování vodních par obsažených ve spalinách na povrchu stěny kotle. Při nižší teplotě dochází nízkoteplotní korozi na stěnách kotle.

7. Technické parametry

7.1 Množství generátorového plynu

Množství plynů je stanoveno z požadovaného výkonu, účinnosti kotle a vypočtené výhřevnosti plynu (15). Rovnice je dána vztahem:

$$Q_p = \frac{P_{ref}}{Q_i \cdot \eta_{ref}} = \frac{25}{4\,680 \cdot 0,85} = 0,0063 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1} = 22,7 \text{ m}_N^3 \cdot \text{hod}^{-1} \quad (46)$$

kde $P_{ref} [\text{kW}]$ je požadavek na výkon kotle (3.1)

$\eta_{ref} [1]$ je požadavek na účinnost kotle (4.4).

7.2 Celkové množství vzduchu a spalín

Množství spalovacího vzduchu (sekundární vzduch) je stanoveno navýšením skutečného množství vzduchu (27) o množství plynu potřebného k dosažení výkonu (46). Rovnice je dána vztahem:

$$Q_{vz} = V_{20} \cdot Q_p = 1,54 \cdot 0,0063 = 0,0097 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (47)$$

Množství spalín je stanoveno navýšením skutečných spalín (28) o množství plynu potřebného k dosažení výkonu (46). Rovnice je dána vztahem:

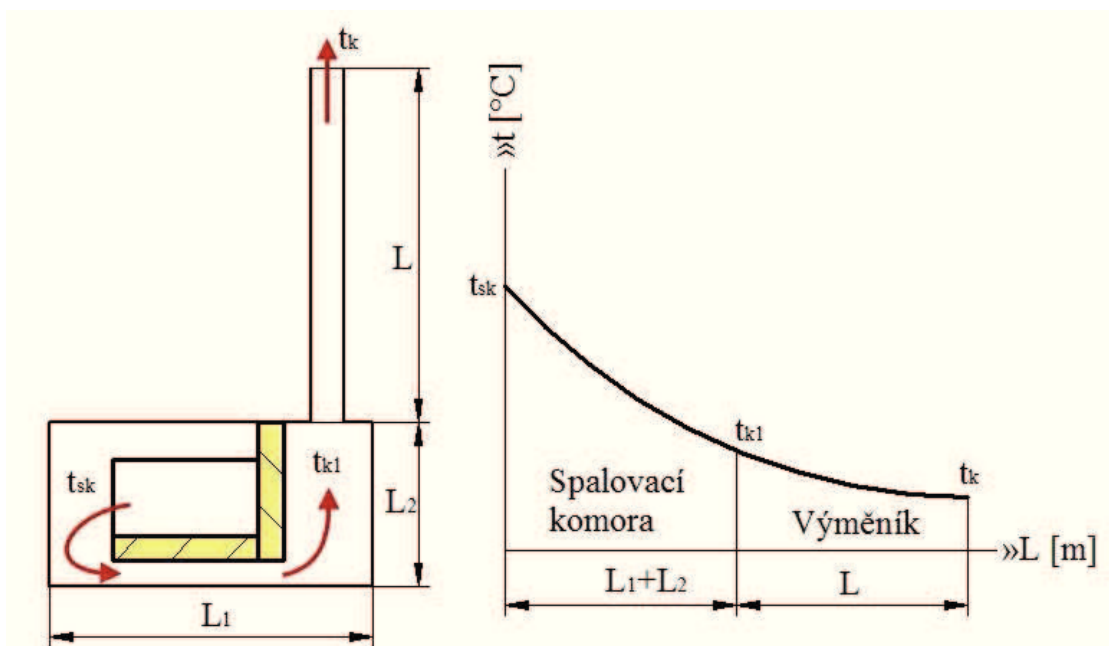
$$Q_k = V_{160} \cdot Q_p = 3,5 \cdot 0,0063 = 0,022 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (48)$$

7.3 Tepelný výkon

Pro stanovení tepelného výkonu kotle se nejdříve určí měrná tepelná kapacita spalín, která je dána vztahem:

$$c_k = \sum c_i = N_2 \cdot c_{s,N_2} + O_2 \cdot c_{s,O_2} + CO_2 \cdot c_{s,CO_2} + H_2O \cdot c_{s,H_2O} = 0,794 \cdot 1,31 + 0,038 \cdot 1,33 + 0,149 \cdot 1,82 + 0,085 \cdot 1,52 = 1,49 \text{ kJ} \cdot \text{m}_N^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \quad (49)$$

kde $c_s [\text{kJ} \cdot \text{m}_N^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$ jsou střední měrné kapacity plynů při teplotě 200 °C [7, str. 162].



Obr. 27. Tepelná bilance spalovací komory a výměníku.

7.3.1 Spalovací komora

Tepelná bilance spalovací komory vychází z množství spalin (48) naměřených teplot ve spalovací komoře dle Obr. 27. a je dána vztahem:

$$P_{SK} = Q_k \cdot c_k(t_{sk} - t_{k_1}) = 0,022 \cdot 1,49(800 - 300) = 16,4 \text{ kW} \quad (50)$$

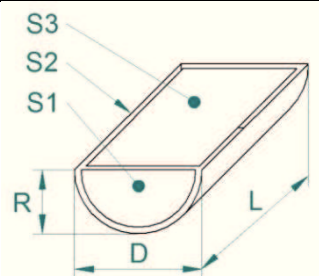
kde $t_{sk} [^{\circ}\text{C}]$ je teplota ve spalovací komoře

$t_{k_1} [^{\circ}\text{C}]$ je teplota spalin na vstupu do výměníku.

Celková teplosměnná plocha spalovací komory je dána vztahem:

$$S = \frac{P_{SK}}{\alpha_k \cdot (t_{sk} - t_{k_1})} = \frac{16\,400}{50 \cdot (800 - 300)} = 0,66 \text{ m}^2 \quad (51)$$

kde $\alpha_k [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla spalin při teplotě 800°C .

	Plocha	Hodnota [m^2]
	$S_1 = \frac{\pi \cdot R^2}{2}$	0,07
	$S_2 = \pi \cdot R \cdot L$	0,37
	$S_3 = D \cdot L$	0,23
	$S_C = S_1 + S_2 + S_3$	0,67

Tab. 6. Návrh výhřevných ploch spalovací komory.

Pro splnění vypočtené celkové teplosměnné plochy musí platit podmínka $S_C \geq S$.

7.3.2 Výměník tepla

Při zanedbání tepelných ztrát vychází tepelná bilance výměníku z množství spalin (48) a naměřených teplot na vstupu a na výstupu z výměníku dle Obr. 27. Rovnice je daná vztahem:

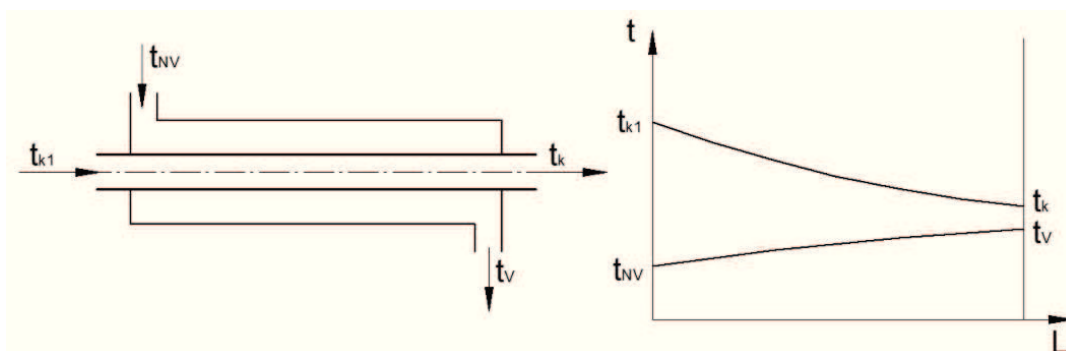
$$P_V = Q_k \cdot c_k(t_{k_1} - t_k) = 0,022 \cdot 1,49(300 - 160) = 5 \text{ kW} \quad (52)$$

Střední rozdíl teplot u souproudého výměníku je definován stanovenými teplotami na Obr. 28. Rovnice je dána vztahem:

$$\Delta t_{stř} = \frac{(t_{k_1} - t_{NV}) - (t_k - t_V)}{\ln \frac{(t_{k_1} - t_{NV})}{(t_k - t_V)}} = \frac{(300 - 60) - (160 - 80)}{\ln \frac{(300 - 60)}{(160 - 80)}} = 146^{\circ}\text{C} \quad (53)$$

kde $t_{NV} [^{\circ}\text{C}]$ je teplota vody na vstupu do výměníku

$t_V [^{\circ}\text{C}]$ je teplota vody na výstupu z výměníku.



Obr. 28. Průběh teplot v souproudém výměníku.

Součinitel prostupu tepla válcovou stěnou je dán vztahem:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_k}} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{0,0032}{50} + \frac{1}{30}} = 29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (54)$$

kde $\alpha_v [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla vody při teplotě 80 °C

$s [\text{m}]$ je stěna (tloušťka) trubky

$\lambda [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti trubky při teplotě 500 °C

[9, str. 72]

$\alpha_k [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla spalin při teplotě 200 °C.

Délka teplosměnné trubky ve svazku výměníku je dána vztahem:

$$l = \frac{P_v}{k \cdot \Delta t_{stř}} = \frac{5\,000}{29 \cdot 149} = 1\,200 \text{ mm} \quad (55)$$

Dostatečné ochlazení spalin na požadovanou výstupní teplotu je zajištěno vypočtenou délkou trubky (55). Pro návrh konstrukce výměníku je vypočtená délka trubky rozdělena na 5 trubek. Po rozdělení vypočtené délky je délka jednotlivých trubek 240 mm.

7.3.3 Tepelný výkon kotle

$$P = Q_k \cdot c_k (t_{sk} - t_k) = 0,22 \cdot 1,49 (800 - 160) = 21 \text{ kW} \quad (56)$$

K celkovému výkonu kotle není započítaný tepelný výkon příkládací komory. Z důvodu složitosti (proměnlivá teplota komory v závislosti na fázi zplyňování) je výkon komory stanovený odvozením z měření výkonu kotle při vykonání laboratorní zkoušky.

7.4 Komínový tah

Pro stanovení komínového tahu pro vypočtené množství spalin (48) se nejdříve určí rychlost proudění spalin v komínu při zvoleném vnitřním průřezu komína, která je dána vztahem:

$$w_k = \frac{4 \cdot Q_k}{\pi \cdot d_k^2} = \frac{4 \cdot 0,022}{\pi \cdot 0,16^2} = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (57)$$

kde d_k [m] je vnitřní průřez komína.

U komína s přirozeným tahem je komínový tah dán zejména výškou a průřezem komína, hustotou a teplotou spalin a charakteristickými vlastnostmi komína [13].

Statický komínový tah je dán vztahem:

$$P_H = h \cdot g \cdot (\rho_{vz} - \rho_k) = 7 \cdot 9,81(1,2 - 0,82) = 26 \text{ Pa} \quad (58)$$

kde h [m] je stanovená výška komínu

ρ_{vz} [kg · m⁻³] je hustota vzduchu při teplotě 20 °C [7, str. 160].

Tlaková ztráta komína je dána vztahem:

$$P_R = S_E \left(\psi \frac{h}{d_k} + \sum \xi \right) \frac{\rho_k}{2} \cdot w_k^2 + S_E \left(\frac{\rho_k}{2} \cdot w_k^2 \right) = 1,5 \left(0,05 \frac{7}{0,16} + 1 \right) \frac{0,82}{2} \cdot 1,1^2 + 1,5 \left(\frac{0,82}{2} \cdot 1,1^2 \right) = 2,4 \text{ Pa} \quad (59)$$

kde S_E [–] je součinitel bezpečnosti pro proudění spalin v komíně

ψ [–] je součinitel tření v komíně

$\sum \xi$ [–] je součinitel místních ztrát.

Účinný komínový tah je dán vztahem:

$$P_Z = P_H - P_R = 26 - 2,4 = 23,6 \text{ Pa} \quad (60)$$

8. Účinnost kotle

Účinnost kotle je zjednodušeně stanovena dle literatury [10, str. 50].

8.1 Ztráta komínová

Ztráta komínová je stanovena množstvím tepla ve spalínách za výstupním hrdlem kotle, tj. na vstupu do komína, která je dána vztahem:

$$\xi_k = \frac{V_{sp} \cdot c_k (t_k - t_{vz})}{Q_i} \cdot 100 = \frac{2,21 \cdot 1,49 \cdot (160 - 20)}{4\,680} \cdot 100 = 9,85 \% \quad (61)$$

8.2 Ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem stanovuje nedokonalé spalování hořlaviny ve formě uhlíku v popelu (neshoří). Nespálené složky hořlaviny se nacházejí v tuhých zbytcích po spálení, které propadnou roštem (popel) nebo uletí komínem (popílek). Ztráta je dána vztahem:

$$\xi_{NT} = \frac{A^r \cdot c_k \cdot Q_C}{Q_i} \approx \text{dle normy ČSN EN 13240} = 0,5 \% \quad (62)$$

Z důvodu nízkého obsahu popeloviny ve dřevě, které nepřevyšuje 1 %, díky dostatečnému času vyhoření tuhých zbytků a zanedbání úletu tuhých částic, se ztráta stanoví normativně.

8.3 Ztráta plynným nedopalem

Ztráta plynným nedopalem stanovuje nedokonalé spalování uhlíku v plynné formě jako oxid uhelnatý ve spalínách. Obsah oxidu uhelnatého ve spalínách ovlivňuje kvalitu spalování dřeva, zejména tvorbu dehtových látek. Ztráta je dána vztahem:

$$\xi_{NP} = \frac{V_{sp} \cdot CO \cdot Q_{i,CO}}{Q_i} = \frac{2,21 \cdot 0,072 \cdot 12\,640}{4\,680} = 0,43 \% \quad (63)$$

kde CO [1] je emisní limit CO pro emisní třídu 4 při 6 % O₂

$Q_{i,CO}$ [kJ · m⁻³] je výhřevnost plynu [8, str. 122].

8.4 Celková účinnost

Celková účinnost kotle je součet dílčích ztrát a je dána vztahem:

$$\eta = 100 - (\xi_k + \xi_{NT} + \xi_{NP}) = 100 - (9,85 + 0,5 + 0,43) = 89,2 \% \quad (64)$$

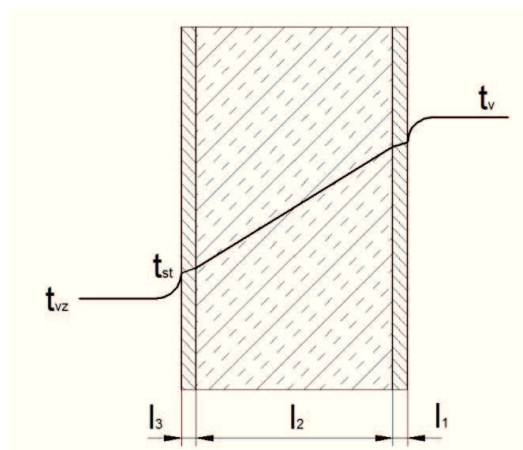
Požadovaná účinnost dle normy ČSN EN 303-5 emisní třídy 4 je dána vztahem:

$$\eta_{ref} = 80 + 2 \log \cdot P_{ref} = 80 + 2 \log \cdot 25 = 83 \% \quad (65)$$

Pro splnění požadavku (4.4) se stanoví porovnání celkové účinnosti s požadovanou účinností, kdy musí platit podmínka $\eta > \eta_{ref}$. V celkové účinnosti není započítána ztráta sdílením tepla kotle do okolí, která se stanovuje individuálním měřením na povrchu opláštění kotle. Z důvodu měření nekompletního vzorku (bez opláštění) není hodnota započítána.

9. Tepelná izolace

Z důvodu zajištění vysoké účinnosti kotle je stanovena maximální povrchová teplota na opláštění kotle 30 °C.



Obr. 29. Prostup tepla.

Tepelný tok se stanoví Newtonovou rovnicí pro chlazení stěny, která je dána vztahem:

$$q = \alpha_{vz} \cdot (t_{st} - t_{vz}) = 10 \cdot (30 - 20) = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (66)$$

kde $\alpha_{vz} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla vzduchu při teplotě 20 °C

$t_{st} [^{\circ}\text{C}]$ je stanovená povrchová teplota.

Tloušťka izolace se stanoví odvozením z rovnice prostupu tepla rovinnou stěnou, která je dána vztahem:

$$q = \frac{t_v - t_{vz}}{\frac{1}{\alpha_{vz}} + \frac{l_1}{\lambda} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}} \rightarrow l_2 = \lambda_2 \cdot \left[\frac{t_v - t_{vz}}{q} - \left(\frac{1}{\alpha_{vz}} + \frac{l_1}{\lambda} + \frac{l_3}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v} \right) \right] = 0,07 \cdot \left[\frac{80-20}{100} - \left(\frac{1}{10} + \frac{0,001}{50} + \frac{0,003}{50} + \frac{1}{2000} \right) \right] = 35 \text{ mm} \quad (67)$$

kde $\lambda_2 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti izolace

$l_1 [\text{m}]$ je tloušťka opláštění

$l_3 [\text{m}]$ je tloušťka stěny vodního pláště.

Pro zajištění stanovené povrchové teploty opláštění je minimální tloušťka tepelné izolace 35 mm.

10. Ekonomika

Spotřeba tepla pro vytápění a ohřev teplé vody je stanovena dle výpočtového programu na webových stránkách www.tzb.info.cz [11]. Zadané hodnoty pro určení celkové potřeby tepla a ohřevu teplé vody jsou:

- lokalita – Opava
- tepelné ztráty objektu – 20 kW
- průměrná vnitřní teplota – 20 °C
- teplota studené a teplé užitkové vody – 10/55 °C
- celková spotřeba teplé vody pro 4 člennou rodinu – 0,328 m³/den

Výsledná celková roční spotřeba tepla na vytápění a ohřev teplé vody je 185,6 GJ.rok⁻¹ (51,6 MWh.rok⁻¹).

Vytápění zplyňovacím kotlem je srovnáváno s automatickým kotlem na hnědé uhlí, automatickým kotlem na pelety a kondenzačním kotlem na zemní plyn. Hodnoty výhřevnosti a ceny paliva uvedené v Tab. 7. jsou použity z webové stránky www.tzb.info.cz. Hodnoty účinnosti jsou použity od jednotlivých výrobců kotlů. Ceny jednotlivých kotlů jsou použity z webové stránky www.akoupelnyatopeni.cz a jsou uvedeny včetně DPH.

Stanovení spotřeby jednotlivých druhů paliva je dáno vztahem:

$$m_p = \frac{Q_c}{Q_i \cdot \eta} \text{ [kg} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (68)$$

kde $Q_c [\text{MJ} \cdot \text{rok}^{-1}]$ je celková spotřeba tepla na vytápění a ohřev teplé vody

$Q_i [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$ je výhřevnost jednotlivých paliv

$\eta[1]$ je účinnost jednotlivých kotlů.

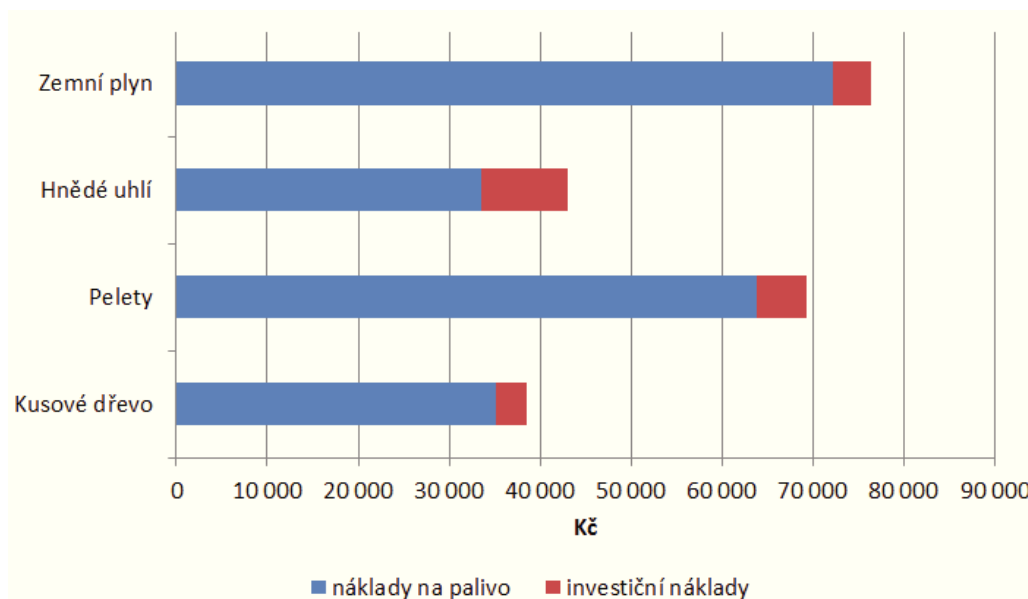
Palivo	Jednotky	Kusové dřevo	Pelety	Hnědé uhlí	Plyn
Druh		Buk	A1	Ořech 2	Zemní plyn
Výhřevnost	[MJ.kg ⁻¹]	14,2 ₁₎	18	18	9,5 ₂₎
Cena paliva	[Kč.kg ⁻¹]	2,1	5,7	2,8	1,367 ₃₎
Spotřeba m_p	[kg.rok ⁻¹]	16 757	11 208	11 990	52 863 ₄₎
Náklady na palivo	[Kč.rok ⁻¹]	35 190	63 884	33 571	72 263
Kotel		Dakon KP Pyro F 26kW	OPOP Black Star 30 Kompakt	Benekov C 26 Climatix 2	PROTHERM Tiger Condens 25 KKZ 42
Účinnost	[%]	78	92	86	108,4
Cena kotle	[Kč]	33 000	53 600	94 000	40 600
Náklady na provoz kotle	[Kč.rok ⁻¹]	38 490	69 244	42 971	76 323

1) Při vlhkosti 20 %, 2) [kWh.m⁻³], 3) [Kč.kWh], 4) [kWh.rok⁻¹]

Tab. 7. Srovnání jednotlivých paliv.

Investiční náklady zahrnují cenu pořízení kotle, která je rozpočítaná na 10 let (pravděpodobná životnost kotle). Investiční náklady nezahrnují náklady na pořízení topného systému, komína, skladování pevných paliv, případně přípojky na zemní plyn. Investiční náklady lze snížit finančními dotačními podporami (Kotlíková dotace nebo Zelená úsporám).

V cenách ročních nákladů na provoz kotlů jsou započítány roční náklady na palivo a roční investiční náklady. V ročních nákladech nejsou započítány elektrická spotřeba na provoz kotle a povinná kontrola komína.



Obr. 30. Srovnání nákladů při vytápění jednotlivými druhy paliva.

Nejlepší variantou ze zjednodušeného srovnání nákladů paliv (Obr. 30.) je vytápění ve zplyňovacím kotli na kusové dřevo. V nákladech není započítán potřebný čas obsluhy k ručnímu přikládání paliva, které je 3-krát až 6-krát za den a je individuální dle aktuální potřeby vytápění. Dále není započítán potřebný čas obsluhy pro pravidelné čištění kotle. Pro zvýšení komfortu obsluhy se doporučuje pořízení akumulční nádrže, která také není započítaná v investičních nákladech.

Druhou nejlepší variantou je vytápění automatickým kotlem na hnědé uhlí. V nákladech nejsou započítány čas obsluhy na ruční přikládání a čištění kotle. Výhodnější pro obsluhu je méně časté přikládání paliva z důvodu automatického provozu kotle a velikosti zásobníku paliva. Zásobník paliva umožňuje bezobslužný provoz obvykle po dobu 2 až 4 dní. Z důvodu jednoduché regulace výkonu kotle není potřebné pořídit akumulční nádrž.

Nejhorší variantou je vytápění kondenzačním kotlem na zemní plyn. Náklady na palivo jsou přibližně dvojnásobné oproti vytápění kusovým dřevem. Výhodou je minimální náročnost obsluhy na provoz kotle.

11. Měřicí protokol

Pro provedení laboratorních zkoušek prototypů se použilo kusové dřevo o délce 500 mm. Zvoleným druhem dřeva je buk s obsahem vody 15%.

11.1 Prototyp A

Nastavení spalovacího vzduchu:

- Primární vzduch: otevřený na 27 % (365 mm²),
od 40 minuty otevřený na 31 % (420 mm²).
- Sekundární vzduch: otevřený na 70 % (254 mm²),
od 60 minuty otevřený na 100 % (363 mm²).

Ve 190 minutě se provedl zásah v kotli. Tvořící se klenba dřeva v příkladací komoře zapříčinila nárůst emisí. Pro její odstranění došlo k prohrábnutí dřeva v komoře.

V Tab. 8. jsou uvedeny naměřené průměrné hodnoty technických parametrů kotle. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze v Tab. 14. Pro ověření splnění požadavků je uveden jejich status v Tab. 8.

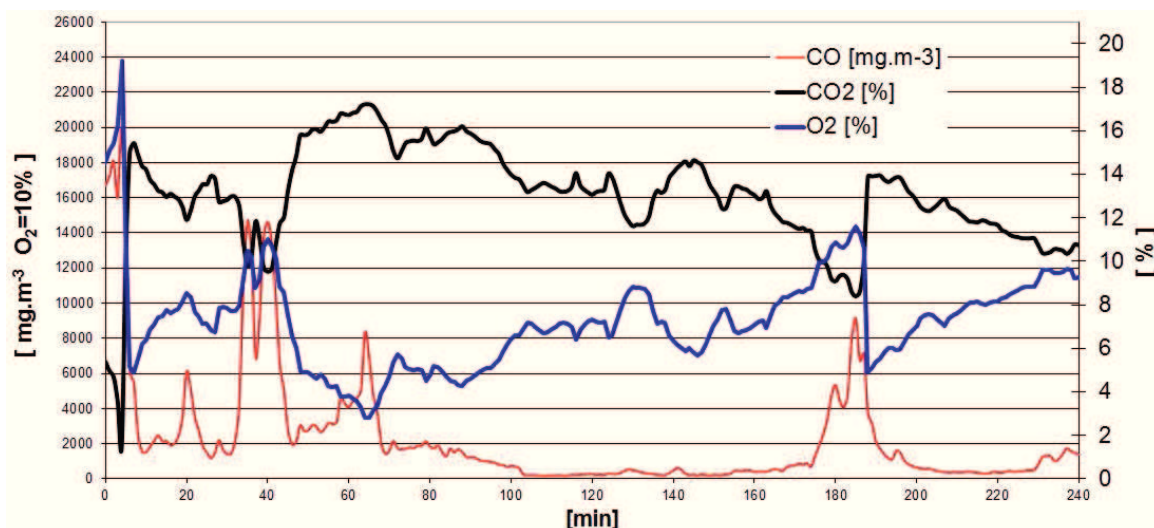
Doba hoření [min]	Výkon [kW]	Komínový tah [Pa]	Teplota spalin [°C]	Teplota vzduchu [°C]
240	24	20	136	25
Splněno	Splněno	Splněno	Splněno	–

Tab. 8. Technické parametry zkoušky.

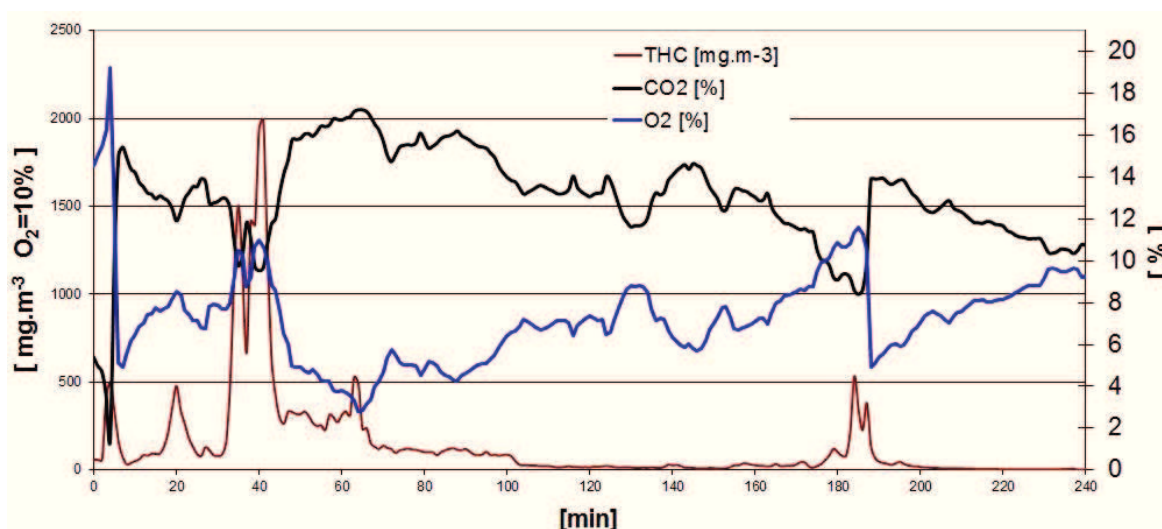
V Tab. 9. jsou uvedeny změřené průměrné hodnoty emisních parametrů kotle. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze v Tab. 15. Pro ověření splnění požadavků je uveden jejich status v Tab. 9. Průběh tvorby oxidu uhelnatého během zkoušky je znázorněn na Obr. 31. Průběh tvorby uhlovodíků (THC) během zkoušky je znázorněn na Obr. 32.

CO [mg.m ⁻³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	THC [mg.m ⁻³]
2360	13	7,3	143
Nesplněno	–	–	Nesplněno

Tab. 9. Emisní parametry zkoušky.



Obr. 31. Graf průběhu tvorby emisí CO.



Obr. 32. Graf průběhu tvorby emisí THC – uhlovodíky.

11.2 Prototyp B

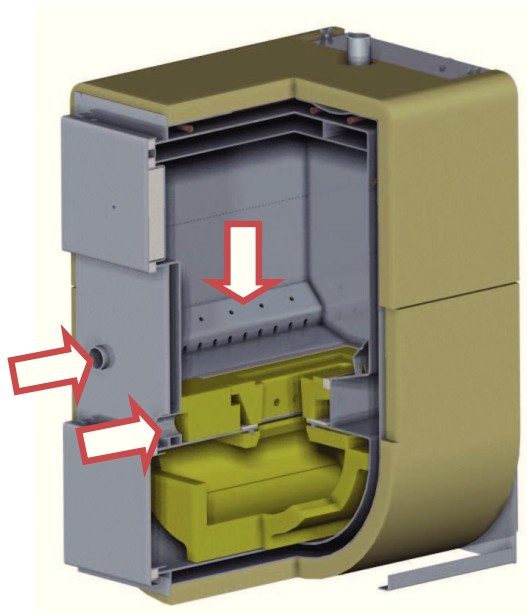
Poloha přívodů spalovacího vzduchu (primárního a sekundárního) je přemístěna z boční strany kotle na přední stranu (Obr. 33.).

Ve spodní části příkladací komory je umístěn plech, který rozvádí primární vzduch, což snižuje tvorbu klenby. Tento plech je umístěn po celé hloubce komory pro zajištění kontrolovaného rozvodu vzduchu. Tvar plechu je přizpůsobený velikosti kartáče, aby bylo zajištěno dostačující vyčištění ploch plechu.

Vstupující sekundární vzduch proudí kanálem kolem teplé keramické tvarovky, čímž se sekundární vzduch přehřívá.

Nastavení spalovacího vzduchu:

- Primární vzduch: otevřený na 25 % (340 mm²).
- Sekundární vzduch: otevřený na 38 % (520 mm²).



Obr. 33. Vzorek B včetně označených úprav.

V Tab. 10. jsou uvedeny naměřené průměrné hodnoty technických parametrů kotle. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze v Tab. 16. Pro ověření splnění požadavků je uveden jejich status v Tab. 10.

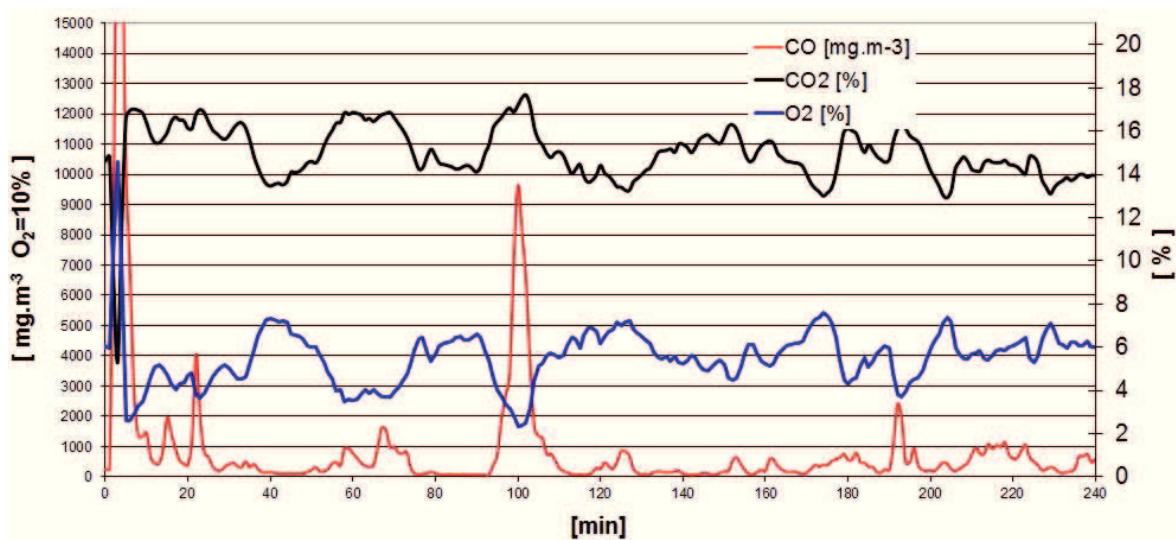
Doba hoření [min]	Výkon [kW]	Komínový tah [Pa]	Teplota spalin [°C]	Teplota vzduchu [°C]
240	23	23	142	–
Splněno	Splněno	Splněno	Splněno	–

Tab. 10. Technické parametry zkoušky.

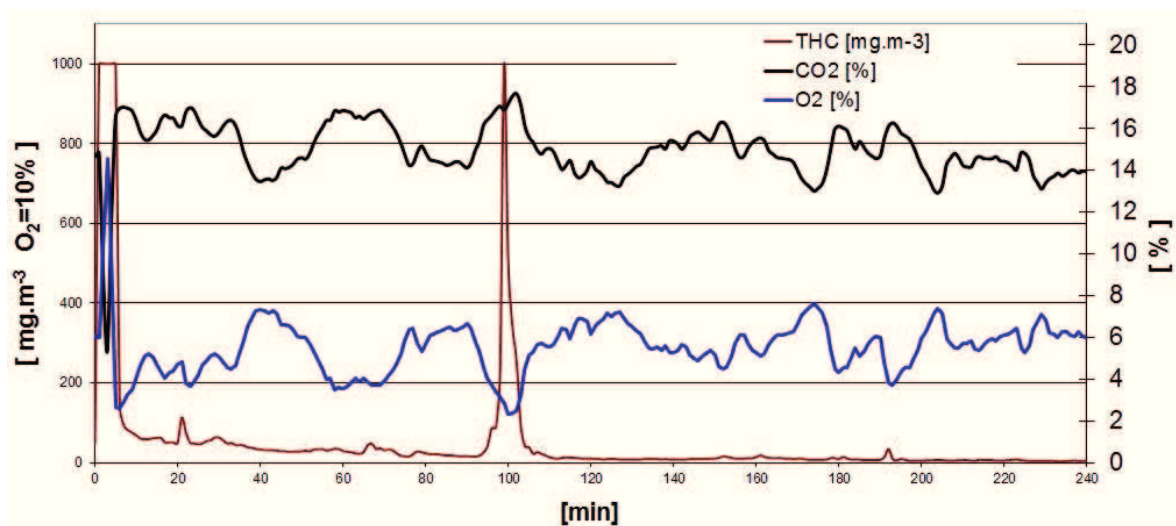
V Tab. 11. jsou uvedeny naměřené průměrné hodnoty emisních parametrů kotle. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze v Tab. 17. Pro ověření splnění požadavků je uveden jejich status v Tab. 11. Průběh tvorby oxidu uhelnatého během zkoušky je znázorněn na Obr. 34. Průběh tvorby uhlovodíků (THC) během zkoušky je znázorněn na Obr. 35.

CO [mg.m ⁻³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	THC [mg.m ⁻³]
900	15	5,5	52
Splněno	–	–	Splněno

Tab. 11. Emisní parametry zkoušky.



Obr. 34. Graf průběhu tvorby emisí CO.



Obr. 35. Graf průběhu tvorby emisí THC – uhlovodíky.

12. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a popisem zplyňovacího kotle s využitím biomasy pro vytápění rodinných domů, konkrétně je návrh kotle řešený pro kusové dřevo. Celá práce je rozdělena do několika kapitol. Úvodní část se věnuje popisu termochemické přeměny biomasy. Dále se porovnávají rozdílné zplyňovací generátory s využitím pro zplyňování biomasy. Následuje obecné rozdělení zplyňovacího kotle včetně funkcí jeho jednotlivých částí.

V dalších kapitolách je rozepsaný technický návrh kotle se stanovenými požadavky včetně doporučeného zapojení kotle do topného systému. Následuje popis řešení kotle, který je stručný vzhledem k uchování detailních konstrukčních znalostí (know-how) společnosti Bosch Termotechnika v Krnově, která se podílela na vývoji kotle. Při návrhu kotle byl kladen důraz na jednoduchost a využití stávajících žáruvzdorných keramických tvarovek k dosažení 4. emisní třídy dle ČSN EN 303-5.

V následujících kapitolách se návrh realizuje pomocí výpočtové části se zaměřením na statiku spalování, stanovení tepelného výkonu s návrhem teplosměnných ploch a na výpočet účinnosti kotle.

Předposlední kapitola se zabývá jednoduchým ekonomickým srovnáním zplyňovacího kotle s dalšími typy kotlů pro zajištění vytápění rodinných domů.

Poslední kapitola je orientována na experimentální ověření parametrů vyrobeného prototypu. Měření probíhalo dle normy ČSN EN 303-5 na zkušebně v prostorách společnosti Bosch Termotechnika. Zkouška prototypu A prokázala splnění technických parametrů kotle. Emisní parametry nebyly splněny z důvodu nerovnoměrného průběhu hoření během měřené doby, a proto během zkoušky bylo nutné provést několik zásahů na kotli. Ke zlepšení průběhu hoření se upravil prototyp B, který už splnil technické i emisní parametry.

Zkouška prokázala v krátkodobém časovém úseku několik navýšení emisních hodnot, které ale mohou být redukovány konstrukčními úpravami v příkládací komoře. Jednou z nich je vyzdění dna komory žáruvzdornými keramickými tvarovkami pro snížení ochlazení žhavé vrstvy vytvořené odhoříváním paliva. Další úpravou je použití krycího plechu po stranách komory pro zvýšení teploty při sušení paliva.

12.1 Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval společnosti Bosch Termotechnika, která mi umožnila realizovat tento projekt za použití svých materiálů a prostorů. Dále bych chtěl poděkovat za spolupráci pracovníkům výroby a zkušební laboratoře při realizaci prototypu zplyňovacího kotle a jeho následného měření. Děkuji také za poskytnutí informativních materiálů potřebných k publikování této diplomové práce. Díky společnosti Bosch Termotechnika jsem při tvorbě tohoto projektu uplatnil všechny své dosavadně získané znalosti a zkušenosti.

12.2 Použitá literatura

- [1] OCHODEK, Tadeáš a Jan NAJSER. *Zplyňování biomasy I*. Ostrava: Výzkumné energetické centrum, 2014. ISBN 978-80-248-3302-6.
- [2] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování biomasy: možnosti uplatnění. *Biom.cz* [online]. [cit. 2010-07-12]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>
- [3] CHŁOND, Rafał Adam. *Zvyšování výhřevnosti a kvality plynu ze zplyňování biomasy: autoreferát doktorské disertační práce*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012, 31 s. ISBN 978-80-248-2782-7.
- [4] *Projekční podklady Dakon KP Pyro F*. Bosch Termotechnika
- [5] EBERT, Hans-Peter. *Topení dřevem ve všech druzích kamen*. 1. české vyd. Ostrava: Hel, 2007, 159 s. ISBN 978-80-86167-29-9.
- [6] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí: autoreferát doktorské disertační práce*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 62 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 80-248-0204-X.
- [7] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika: autoreferát doktorské disertační práce*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [8] RÉDR, Miroslav. *Základy tepelné techniky: autoreferát doktorské disertační práce*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1991, 677 s. ISBN 80-030-0366-0.
- [9] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty: autoreferát doktorské disertační práce*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009, 100 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6.

- [10] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování dřeva v malém ohništi: autoreferát doktorské disertační práce*. Vyd. 1. Suchdol nad Odrou: Romotop, 2008, 80 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-248-1889-4.
- [11] Potřeba tepla pro vytápění a ohřev teplé vody. *TZB-info.cz* [online]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-potreba-tepla-pro-vytapani-a-ohrev-teple-vody>.
- [12] NAVRÁTIL, Jan. *Domácí kůtil a - dřevoplyn*. Vyd. 1. Prostějov: Jan Navrátil, 1998, 132 s. ISBN 80-902-2442-3.
- [13] LULKOVÍČOVÁ, Otília. *Zdroje tepla a domovní kotelny*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 223 s. Vytápění. ISBN 80-807-6002-0.

13. Přílohy

13.1 Výkres

Příloha připevněná na zadní obálce této diplomové práce obsahuje grafickou podobu prototypu A, tj. montážní výkres zplyňovacího kotle bez opláštění.

13.2 Tabulky

Přebytek vzduchu	Množství vzduchu	Množství spalín	Účinnost spalování
1,1	1,1	1,91	91,50
1,2	1,2	2,01	91,05
1,3	1,3	2,11	90,60
1,4	1,4	2,21	90,16
1,5	1,5	2,31	89,71
1,6	1,6	2,41	89,27
1,7	1,7	2,51	88,82
1,8	1,8	2,61	88,38
1,9	1,9	2,71	87,93
2	2	2,81	87,48

Tab. 12. Vliv přebytku vzduchu na množství vzduchu, spalín a účinnosti spalování.

η	A	V_{sp}	k	η	A'	$V_{sp, ned}$	q
0,1	9,786	10,626	3,10559	0,1	9,996	10,831	18,51168
0,2	4,788	5,628	5,863539	0,2	4,998	5,833	16,37236
0,3	3,122	3,962	8,329127	0,3	3,332	4,167	14,51884
0,4	2,289	3,129	10,5465	0,4	2,499	3,334	12,89742
0,5	1,7892	2,6292	12,55135	0,5	1,9992	2,8342	11,46708
0,6	1,456	2,296	14,37282	0,6	1,666	2,501	10,19592
0,7	1,218	2,058	16,03499	0,7	1,428	2,263	9,058772
0,8	1,0395	1,8795	17,55786	0,8	1,2495	2,0845	8,0355
0,9	0,900667	1,740667	18,95825	0,9	1,110667	1,945667	7,109817
1	0,7896	1,6296	20,25037	1	0,9996	1,8346	6,268396
$A = O_{\min} \left(\frac{4,76}{\eta} - 1 \right) [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$ $V_{sp}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} + A [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$ $k = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp}^s} \cdot 100 [\%]$				$A' = \frac{4,76}{\eta} \cdot O_{\min} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$ $V_{sp, ned}^s = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{N_2} + A' - \Omega_{\min} [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$ $q = \frac{\frac{1}{\eta} \cdot O_{\min} - \Omega_{\min}}{V_{sp, ned}^s} \cdot 100 [\%]$			

Tab. 13. Hodnoty pro stanovení Ostwaldova trojúhelníku.

Čas	Teplota výstupní vody	Teplota vstupní vody	Teplota napájecí vody	Průtok	Výkon	Teplota spalín	Komínový tah	Teplota vzduchu
min	°C	°C	°C	m ³ ·s ⁻¹	kW	°C	Pa	°C
0	65,9	55,1	8,1	0,362	21,4	120	21	25
10	60,7	50,4	7,9	0,415	20,5	125	20	25
20	62,2	51,6	7,9	0,468	19,8	130	20	25
30	63,4	52,8	8,1	0,521	20,3	130	20	25
40	62,4	52,2	7,9	0,574	20,3	123	21	25
50	64,9	53,7	7,9	0,627	20,6	138	20	25
60	69,3	57,1	8,1	0,68	21,9	143	20	25
70	73	60,3	8	0,733	23,3	145	20	25
80	75,3	62,2	8	0,786	24,5	145	20	25
90	78	64,3	8	0,839	25,4	147	21	25
100	79	65	8	0,892	26,1	144	21	25
110	78	64	8	0,945	26,1	143	21	25
120	77,6	62,9	8	0,998	25,8	143	20	25
130	76,9	62,5	8	1,051	25,6	142	20	25
140	76,3	62,8	8	1,104	25,4	142	20	25
150	77,8	64	8	1,157	25,5	142	20	25
160	78,3	64,5	8	1,21	25,9	141	20	25
170	78	64,5	8	1,263	25,9	138	21	25
180	75,6	62,5	8,2	1,316	25,4	130	21	25
190	75	62	8	1,368	24,4	134	21	25

200	76,3	63	8,1	1,42	24,5	133	21	25
210	76,5	63	8	1,473	25,3	133	21	25
220	76,2	63,1	8,1	1,527	25,7	133	20	25
230	75,8	62,7	8,1	1,58	25,1	131	21	25
240	74,8	61,8	8,2	1,633	24,8	130	20	25

Tab. 14. Hodnoty technických parametrů prototypu A.

Čas [min]	CO [mg.m ⁻³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	THC [mg.m ⁻³]	Čas [min]	CO [mg.m ⁻³]	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	THC [mg.m ⁻³]
0	16692	5,39	14,57	60	120	281	13,07	7,35	16
1	17257	4,96	15,11	59	121	225	13,19	7,24	20
2	18085	4,69	15,43	57	122	256	13,24	7,17	19
3	16038	3,55	16,3	410	123	225	13,29	7,22	21
4	19981	1,49	19,22	500	124	324	14,03	6,5	23
5	12875	10,19	11,98	335	125	285	13,83	6,6	21
6	6142	15,05	5,16	158	126	282	13,28	7,16	17
7	5487	15,44	4,91	73	127	357	12,67	7,76	15
8	2598	14,91	5,53	33	128	460	12,14	8,3	15
9	1569	14,39	6,21	41	129	559	11,84	8,64	15
10	1522	14,22	6,42	52	130	491	11,62	8,84	15
11	1837	13,75	6,84	61	131	466	11,69	8,78	13
12	2160	13,54	7,06	85	132	379	11,68	8,8	13
13	2494	13,25	7,43	82	133	346	11,76	8,74	14
14	2150	13,18	7,47	93	134	301	12,06	8,47	13
15	2157	12,96	7,74	92	135	281	12,84	7,73	16
16	1931	13,11	7,61	94	136	236	13,25	7,15	13
17	2015	12,98	7,73	135	137	222	13,15	7,23	12
18	2463	12,85	7,81	217	138	222	13,29	7,19	18
19	3512	12,5	8,14	354	139	347	13,85	6,62	31
20	6111	11,91	8,53	479	140	473	14,08	6,36	27
21	5132	12,34	8,35	344	141	637	14,31	6,15	29
22	3543	12,98	7,67	263	142	518	14,47	6	24
23	2771	13,25	7,42	182	143	299	14,6	5,88	14
24	1879	13,55	7,15	132	144	223	14,38	6,03	14
25	1502	13,54	7,12	91	145	240	14,65	5,83	13
26	1190	13,93	6,83	80	146	199	14,55	5,69	9
27	1500	13,81	6,75	130	147	261	14,43	5,8	10
28	2194	12,74	7,84	112	148	217	13,99	6,21	9
29	1659	12,77	7,91	84	149	198	13,52	6,71	12
30	1426	12,83	7,85	80	150	237	13,23	7,04	11
31	1460	12,99	7,71	87	151	219	12,94	7,33	9
32	2192	12,96	7,71	155	152	220	12,44	7,78	9
33	4292	12,53	7,98	499	153	260	12,45	7,83	10
34	10886	10,86	9,29	1136	154	276	12,96	7,31	18
35	14702	9,77	10,48	1505	155	462	13,42	6,77	28
36	12934	10,23	10,3	1116	156	469	13,45	6,69	27
37	6947	11,84	8,78	669	157	454	13,35	6,81	37

38	9209	11,05	9,18	1417	158	503	13,31	6,84	37
39	13833	9,71	10,67	1394	159	481	13,16	6,96	31
40	14629	9,53	11,01	1944	160	406	13,05	7,09	28
41	13472	9,66	10,67	1991	161	408	12,87	7,25	24
42	10291	10,76	10,07	1260	162	406	12,92	7,26	24
43	6503	11,76	8,84	643	163	418	13,23	6,96	21
44	5065	12,03	8,6	418	164	496	12,57	7,47	24
45	2797	13,26	7,54	295	165	573	12,22	7,96	34
46	1966	14,18	6,55	264	166	521	12,02	8,1	24
47	2099	14,81	6,02	332	167	469	11,81	8,33	23
48	3051	15,8	4,97	330	168	685	11,78	8,35	25
49	2723	15,8	4,92	319	169	749	11,69	8,42	24
50	2764	15,85	4,92	318	170	762	11,58	8,55	33
51	3071	16,06	4,73	333	171	864	11,49	8,66	45
52	2991	16,08	4,63	308	172	816	11,54	8,61	44
53	2655	15,96	4,78	269	173	879	11,4	8,75	20
54	2858	16,17	4,6	250	174	705	11,38	8,77	14
55	3184	16,44	4,28	255	175	1342	10,51	9,41	23
56	3130	16,42	4,23	228	176	1924	10,06	9,94	35
57	3235	16,49	4,26	313	177	2570	10,01	9,97	59
58	4642	16,8	3,78	300	178	3421	9,76	10,16	86
59	4285	16,76	3,76	272	179	4719	9,19	10,67	122
60	4094	16,73	3,81	313	180	5350	9,09	10,88	102
61	4431	16,83	3,67	334	181	4470	9,33	10,67	81
62	4616	16,88	3,6	311	182	4077	9,38	10,65	82
63	5058	17,14	3,32	529	183	4739	9,18	10,82	218
64	8354	17,22	2,81	494	184	7979	8,59	11,3	533
65	6949	17,22	2,83	234	185	9146	8,4	11,6	349
66	4828	17,14	3,13	240	186	6721	8,61	11,27	227
67	3794	16,88	3,38	154	187	7143	10,02	10,57	382
68	2009	16,52	3,95	133	188	3762	13,9	4,92	137
69	1438	16,25	4,27	120	189	3149	13,91	5,1	69
70	1614	15,74	4,7	139	190	2104	13,93	5,4	48
71	2166	15,06	5,38	126	191	1724	13,95	5,53	41
72	1744	14,74	5,74	120	192	1412	13,76	5,8	36
73	1695	15,07	5,54	98	193	1183	13,65	6	29
74	1713	15,44	5,14	113	194	1128	13,76	6,01	39
75	1801	15,52	5,05	118	195	1605	13,87	5,92	47
76	1763	15,56	5,02	123	196	1475	13,84	5,96	35
77	1881	15,53	5,04	117	197	1025	13,53	6,29	27
78	1897	15,65	4,98	115	198	837	13,21	6,64	22
79	2144	16,11	4,5	109	199	724	13,04	6,83	21
80	1852	15,76	4,79	102	200	653	12,77	7,05	18
81	1744	15,38	5,21	102	201	601	12,49	7,36	15
82	1899	15,48	5,15	102	202	579	12,36	7,5	15
83	1525	15,62	4,95	85	203	599	12,31	7,58	13
84	1287	15,84	4,71	102	204	526	12,42	7,5	12

85	1721	15,95	4,53	113	205	455	12,58	7,35	10
86	1522	15,98	4,47	120	206	416	12,78	7,17	10
87	1687	16,08	4,33	125	207	393	12,87	7,05	9
88	1532	16,21	4,26	115	208	364	12,53	7,36	9
89	1239	15,98	4,51	113	209	390	12,41	7,54	10
90	1242	15,88	4,63	120	210	386	12,33	7,61	9
91	1221	15,76	4,73	104	211	373	12,16	7,78	8
92	1098	15,59	4,89	88	212	407	11,99	7,94	7
93	1011	15,48	5,02	85	213	414	11,83	8,11	7
94	1013	15,44	5,07	89	214	381	11,82	8,1	6
95	960	15,38	5,1	104	215	361	11,79	8,15	6
96	935	15,15	5,31	85	216	326	11,88	8,05	5
97	800	14,94	5,47	88	217	293	11,86	8,03	5
98	799	14,5	5,88	82	218	337	11,75	8,12	5
99	688	14,22	6,2	86	219	413	11,73	8,13	5
100	746	13,99	6,41	87	220	361	11,67	8,16	4
101	702	13,84	6,59	80	221	357	11,44	8,28	4
102	619	13,77	6,62	51	222	421	11,36	8,34	4
103	253	13,48	6,87	30	223	454	11,22	8,48	4
104	224	13,19	7,18	28	224	410	11,14	8,61	4
105	223	13,28	7,11	27	225	441	11,12	8,68	4
106	214	13,38	6,97	26	226	440	11,06	8,79	4
107	197	13,51	6,82	25	227	482	11,06	8,83	4
108	190	13,61	6,69	22	228	489	11,06	8,81	4
109	187	13,54	6,74	22	229	510	11,06	8,84	4
110	203	13,43	6,87	22	230	841	10,74	9,18	4
111	206	13,35	6,97	20	231	1252	10,39	9,59	4
112	220	13,22	7,12	16	232	1303	10,37	9,63	4
113	186	13,2	7,17	16	233	1305	10,43	9,62	4
114	199	13,25	7,12	19	234	1023	10,57	9,48	5
115	242	13,45	7,01	21	235	1127	10,55	9,48	5
116	224	14,06	6,4	18	236	1410	10,5	9,52	7
117	248	13,52	6,86	18	237	1740	10,35	9,64	8
118	256	13,3	7,1	16	238	1591	10,49	9,59	3
119	272	13,17	7,23	17	239	1486	10,78	9,23	3

Tab. 15. Hodnoty naměřených emisí prototypu A.

Čas	Teplota výstupní vody	Teplota vstupní vody	Teplota napájecí vody	Průtok	Výkon	Teplota spalin	Kominový tah
min	°C	°C	°C		kW	°C	Pa
0	85,41	63,99	10,98	4,27	22,2	137,22	15,99
10	83,92	63,27	10,95	4,28	21,81	141,62	21,91
20	83,9	63,63	10,95	4,29	21,81	147,5	23,12
30	84,03	63,78	10,92	4,1	20,91	149,11	24,27
40	83,03	63,05	10,93	4,3	21,65	149,24	22,75

50	82,22	62,99	10,9	4,34	21,59	147,77	22,32
60	83,65	63,05	10,89	4,02	20,4	151,68	21,55
70	85,84	64,21	10,89	4,28	22,4	154,39	24,16
80	85,8	65,01	10,97	4,29	22,4	149,94	23,22
90	84,77	65,47	10,94	4,44	22,9	149,47	23,03
100	86,04	64,38	10,94	4,4	23,04	154,69	21,2
110	86,24	66,04	10,91	4,12	21,68	142,58	22,43
120	85,87	65,43	10,86	4,24	22,2	138,56	23,18
130	84,19	63,7	10,87	4,39	22,47	137,73	21,99
140	83,7	63,31	10,89	4,26	21,64	139,23	22,33
150	83,98	63,57	10,93	4,35	22,16	139,93	23,8
160	84,22	63,06	10,96	4,34	22,2	134,66	22,58
170	83,48	58,95	10,87	5,34	27,07	129,82	22,28
180	78,98	56,26	11,12	5,33	25,25	138,75	23,88
190	76,79	54,81	11,02	5,35	24,54	139,25	23,14
200	76,9	55,04	10,94	5,24	24,1	138,05	23,3
210	76,92	54,83	11,12	5,2	23,87	137,24	22,95
220	77,29	55,32	10,97	5,2	24,06	136,72	22,73
230	76,56	55,05	11,09	5,35	24,45	133,11	22,41
240	76,82	55	11,01	5,3	24,34	133,46	22,62

Tab. 16. Hodnoty technických parametrů prototypu B.

Čas	CO	CO ₂	O ₂	THC	Čas	CO	CO ₂	O ₂	THC
[min]	[mg.m ⁻³]	[%]	[%]	[mg.m ⁻³]	[min]	[mg.m ⁻³]	[%]	[%]	[mg.m ⁻³]
0	266	14,62	6,09	48	120	267	14,42	6,18	10
1	249	14,83	5,97	1000	121	475	14,06	6,52	9
2	9375	9,09	10,26	1000	122	359	13,92	6,73	9
3	20420	5,33	14,58	1000	123	271	13,7	6,86	8
4	18410	11,65	10,01	1000	124	499	13,43	7,14	9
5	10350	16,6	2,63	1000	125	859	13,41	7,01	9
6	6850	16,96	2,59	139	126	842	13,27	7,17	9
7	2800	17,02	2,95	93	127	716	13,26	7,21	8
8	1347	16,96	3,25	81	128	263	13,66	6,85	8
9	1331	16,84	3,48	75	129	131	13,81	6,67	8
10	1462	16,39	3,99	68	130	87	13,99	6,51	8
11	650	15,81	4,67	60	131	105	14,19	6,34	8
12	450	15,48	5,09	59	132	91	14,3	6,16	8
13	442	15,45	5,18	59	133	163	14,65	5,81	9
14	900	15,65	5,02	61	134	184	15,02	5,49	9
15	1973	15,94	4,71	62	135	166	15,09	5,45	9
16	1436	16,45	4,3	62	136	150	15,11	5,55	9
17	949	16,65	4,06	50	137	159	15,18	5,37	8
18	540	16,51	4,29	51	138	185	15,02	5,59	9
19	437	16,49	4,35	50	139	205	15,41	5,29	8
20	385	16,14	4,69	49	140	103	15,39	5,24	8
21	1169	16,12	4,8	113	141	89	15,26	5,37	8

22	4064	16,79	3,83	76	142	62	15,01	5,63	8
23	1950	17	3,67	50	143	68	15,25	5,52	8
24	803	16,85	3,87	48	144	95	15,62	5,14	9
25	668	16,43	4,2	46	145	131	15,76	4,99	9
26	353	16,06	4,64	48	146	115	15,83	4,9	9
27	218	15,89	4,88	54	147	85	15,67	5,1	9
28	214	15,7	5,09	56	148	83	15,51	5,27	9
29	351	15,63	5,18	63	149	142	15,43	5,39	10
30	418	15,81	5,04	63	150	186	15,78	5,17	10
31	470	16,11	4,81	56	151	195	16,22	4,59	12
32	360	16,34	4,55	48	152	537	16,3	4,49	16
33	315	16,39	4,5	49	153	648	16,08	4,58	14
34	511	16,15	4,64	44	154	426	15,57	5,11	12
35	327	15,59	5,19	44	155	236	14,96	5,72	10
36	431	14,84	5,89	43	156	98	14,61	6,11	10
37	256	14,31	6,48	38	157	88	14,67	6,12	10
38	156	13,86	6,95	37	158	164	15,06	5,72	11
39	149	13,56	7,25	34	159	235	15,33	5,37	11
40	160	13,46	7,35	33	160	193	15,47	5,26	14
41	136	13,54	7,29	32	161	594	15,55	5,11	18
42	113	13,59	7,17	31	162	565	15,41	5,22	14
43	111	13,51	7,24	31	163	346	14,95	5,67	12
44	113	13,66	7,18	30	164	237	14,78	5,86	11
45	106	14,1	6,61	28	165	172	14,61	6,07	11
46	106	14,08	6,58	28	166	169	14,58	6,11	11
47	106	14,14	6,53	27	167	184	14,54	6,17	10
48	113	14,3	6,38	27	168	128	14,51	6,19	10
49	169	14,54	6,05	27	169	98	14,37	6,29	9
50	231	14,6	5,99	28	170	141	13,98	6,67	10
51	322	14,53	6,01	30	171	266	13,59	7,05	10
52	184	14,82	5,68	28	172	393	13,36	7,27	8
53	187	15,33	5,3	33	173	352	13,19	7,41	7
54	259	15,73	4,88	33	174	397	13	7,61	7
55	443	16,04	4,55	34	175	389	13,15	7,44	7
56	493	16,38	3,98	30	176	524	13,37	7,14	7
57	372	16,41	4,03	32	177	584	14	6,46	8
58	948	16,86	3,5	35	178	638	15,01	5,43	11
59	943	16,78	3,58	34	179	755	15,97	4,48	11
60	772	16,87	3,56	29	180	557	16,11	4,32	9
61	628	16,82	3,62	27	181	574	16,02	4,53	14
62	464	16,76	3,79	26	182	804	15,89	4,56	10
63	367	16,52	4,03	23	183	480	15,37	5,06	8
64	338	16,59	3,88	22	184	464	15,02	5,49	8
65	381	16,45	4,06	26	185	339	15,38	5,07	8
66	962	16,61	3,85	44	186	331	15,11	5,34	6

67	1626	16,76	3,72	47	187	160	14,83	5,67	6
68	1561	16,82	3,69	34	188	143	14,68	5,91	6
69	981	16,87	3,7	36	189	268	14,56	6,06	6
70	1007	16,63	3,9	31	190	213	14,69	5,97	7
71	807	16,36	4,13	33	191	1070	15,54	4,8	14
72	771	16,09	4,41	31	192	2419	16,1	3,8	34
73	824	15,75	4,72	23	193	1910	16,27	3,69	9
74	309	15,29	5,23	17	194	457	16,11	3,98	6
75	113	14,72	5,82	16	195	494	15,78	4,36	9
76	92	14,24	6,39	15	196	950	15,65	4,52	7
77	102	14,33	6,44	21	197	375	15,5	4,56	5
78	123	14,84	5,73	28	198	233	15,14	4,93	5
79	166	15,17	5,33	26	199	194	14,64	5,38	5
80	124	14,84	5,68	23	200	214	14,17	5,94	5
81	88	14,52	6,07	21	201	193	13,84	6,28	5
82	81	14,46	6,18	21	202	340	13,48	6,63	6
83	88	14,41	6,25	21	203	478	13,05	7,13	6
84	87	14,35	6,31	19	204	443	12,92	7,37	6
85	81	14,24	6,45	18	205	254	13,24	7,15	6
86	84	14,28	6,49	18	206	198	14,26	5,93	5
87	89	14,39	6,32	17	207	274	14,58	5,7	5
88	79	14,41	6,35	16	208	360	14,81	5,46	5
89	73	14,25	6,46	16	209	471	14,59	5,48	6
90	73	14,11	6,64	16	210	735	14,23	5,69	6
91	73	14,36	6,45	15	211	976	14,16	5,71	6
92	66	14,96	5,77	15	212	764	14,16	5,83	5
93	77	15,38	5,38	17	213	766	14,55	5,45	5
94	386	16,16	4,54	25	214	1087	14,66	5,4	7
95	710	16,43	4,01	42	215	915	14,56	5,65	6
96	1900	16,64	3,71	87	216	1058	14,55	5,83	6
97	2660	16,91	3,4	88	217	991	14,55	5,91	6
98	3407	17,07	3,13	221	218	1148	14,65	5,82	5
99	7044	16,89	2,84	1000	219	747	14,46	6,03	5
100	9636	17,2	2,32	500	220	601	14,43	6,09	5
101	8100	17,55	2,38	341	221	619	14,35	6,17	6
102	6421	17,67	2,47	253	222	861	14,16	6,27	7
103	3682	17,15	3,19	94	223	1068	14,03	6,43	8
104	1622	16,13	4,44	41	224	665	14,83	5,5	6
105	1359	15,6	5,14	39	225	507	14,8	5,28	5
106	1269	15,34	5,25	22	226	393	14,52	5,59	4
107	743	14,96	5,63	26	227	213	13,75	6,39	4
108	757	14,78	5,73	22	228	258	13,41	6,77	4
109	562	14,99	5,6	18	229	322	13,1	7,12	4
110	296	15,05	5,52	13	230	294	13,39	6,8	4
111	195	14,87	5,65	11	231	160	13,6	6,19	4

112	145	14,42	6,06	10	232	127	13,71	6,13	4
113	97	14,03	6,44	12	233	165	13,86	5,98	3
114	84	14,24	6,38	13	234	184	13,72	6,25	3
115	85	14,46	5,93	12	235	276	13,82	6,24	4
116	71	13,89	6,57	12	236	689	13,99	6,09	4
117	88	13,64	6,87	11	237	671	14	6,06	5
118	137	13,73	6,88	10	238	756	13,87	6,29	4
119	300	13,96	6,74	10	239	475	13,96	6,03	4

Tab. 17. Hodnoty naměřených emisí prototypu B.